

Carbure de tungstène cimenté
Exploration complète des propriétés physiques et chimiques,
des processus et des applications (VII)

中钨智造科技有限公司

CTIA GROUP LTD

CTIA GROUP LTD

Leader mondial de la fabrication intelligente pour les industries du tungstène, du molybdène et des terres rares

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

Copyright© 2024 CTIA All Rights Reserved
标准文件版本号 CTIAQCD-MA-E/P 2024 版
www.ctia.com.cn

电话/TEL: 0086 592 512 9696
CTIAQCD-MA-E/P 2018-2024V
sales@chinatungsten.com

PRÉSENTATION DU GROUPE CTIA

CTIA GROUP LTD, filiale à 100 % dotée d'une personnalité juridique indépendante et créée par CHINATUNGSTEN ONLINE, se consacre à la promotion de la conception et de la fabrication intelligentes, intégrées et flexibles de matériaux en tungstène et en molybdène à l'ère de l'Internet industriel. Fondée en 1997 avec www.chinatungsten.com comme point de départ – le premier site web chinois de produits en tungstène de premier plan –, CHINATUNGSTEN ONLINE est une entreprise pionnière du e-commerce en Chine, spécialisée dans les industries du tungstène, du molybdène et des terres rares. Fort de près de trois décennies d'expérience approfondie dans les domaines du tungstène et du molybdène, CTIA GROUP hérite des capacités exceptionnelles de conception et de fabrication de sa société mère, de ses services de qualité supérieure et de sa réputation commerciale mondiale, devenant ainsi un fournisseur de solutions d'application complètes dans les domaines des produits chimiques à base de tungstène, des métaux tungstène, des carbures cémentés, des alliages haute densité, du molybdène et de ses alliages.

Au cours des 30 dernières années, CHINATUNGSTEN ONLINE a créé plus de 200 sites web professionnels multilingues sur le tungstène et le molybdène, couvrant plus de 20 langues, avec plus d'un million de pages d'actualités, de prix et d'analyses de marché liées au tungstène, au molybdène et aux terres rares. Depuis 2013, son compte officiel WeChat « CHINATUNGSTEN ONLINE » a publié plus de 40 000 informations, alimentant près de 100 000 abonnés et fournissant quotidiennement des informations gratuites à des centaines de milliers de professionnels du secteur dans le monde entier. Avec des milliards de visites cumulées sur son site web et son compte officiel, CHINATUNGSTEN ONLINE est devenu une plateforme d'information mondiale reconnue et faisant autorité pour les industries du tungstène, du molybdène et des terres rares, fournissant 24 h/24 et 7 j/7 des informations multilingues, des informations sur les performances des produits, les prix et les tendances du marché.

S'appuyant sur la technologie et l'expérience de CHINATUNGSTEN ONLINE, CTIA GROUP s'attache à répondre aux besoins personnalisés de ses clients. Grâce à l'IA, CTIA GROUP conçoit et fabrique en collaboration avec ses clients des produits en tungstène et en molybdène présentant des compositions chimiques et des propriétés physiques spécifiques (telles que la granulométrie, la densité, la dureté, la résistance, les dimensions et les tolérances). L'entreprise propose des services intégrés complets, allant de l'ouverture du moule à la production d'essai, en passant par la finition, l'emballage et la logistique. Au cours des 30 dernières années, CHINATUNGSTEN ONLINE a fourni des services de R&D, de conception et de production pour plus de 500 000 types de produits en tungstène et en molybdène à plus de 130 000 clients dans le monde, posant ainsi les bases d'une fabrication personnalisée, flexible et intelligente. Fort de ce socle, CTIA GROUP approfondit la fabrication intelligente et l'innovation intégrée des matériaux en tungstène et en molybdène à l'ère de l'Internet industriel.

Forts de plus de 30 ans d'expérience dans le secteur, le Dr Hanns et son équipe du CTIA GROUP ont également rédigé et publié des analyses de connaissances, de technologies, de prix et de tendances du marché du tungstène, du molybdène et des terres rares, qu'ils partagent librement avec l'industrie du tungstène. Fort de plus de 30 ans d'expérience depuis les années 1990 dans le commerce électronique et le commerce international de produits en tungstène et en molybdène, ainsi que dans la conception et la fabrication de carbures cémentés et d'alliages haute densité, le Dr Han est un expert reconnu des produits en tungstène et en molybdène, tant au niveau national qu'international. Fidèle à sa volonté de fournir des informations professionnelles et de qualité à l'industrie, l'équipe du CTIA GROUP rédige régulièrement des articles de recherche technique, des articles et des rapports sectoriels basés sur les pratiques de production et les besoins des clients, ce qui lui vaut une large reconnaissance au sein du secteur. Ces réalisations apportent un soutien solide à l'innovation technologique, à la promotion des produits et aux échanges industriels du CTIA GROUP, le propulsant pour devenir un leader mondial dans la fabrication de produits en tungstène et en molybdène et dans les services d'information.



COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

Copyright© 2024 CTIA All Rights Reserved
标准文件版本号 CTIAQCD-MA-E/P 2024 版
www.ctia.com.cn

电话/TEL: 0086 592 512 9696
CTIAQCD-MA-E/P 2018-2024V
sales@chinatungsten.com

CTIA GROUP LTD

30 Years of Cemented Carbide Customization Experts

Core Advantages

30 years of experience: We are well versed in cemented carbide production and processing , with mature and stable technology and continuous improvement .

Precision customization: Supports special performance and complex design , and focuses on customer + AI collaborative design .

Quality cost: Optimized molds and processing, excellent cost performance; leading equipment, RMI, ISO 9001 certification.

Serving Customers

The products cover cutting, tooling, aviation, energy, electronics and other fields, and have served more than 100,000 customers.

Service Commitment

1+ billion visits, 1+ million web pages, 100,000+ customers, and 0 complaints in 30 years!

Contact Us

Email : sales@chinatungsten.com

Tel : +86 592 5129696

Official website : www.ctia.com.cn

WeChat : Follow "China Tungsten Online"



COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

Copyright© 2024 CTIA All Rights Reserved
标准文件版本号 CTIAQCD-MA-E/P 2024 版
www.ctia.com.cn

电话/TEL: 0086 592 512 9696
CTIAQCD-MA-E/P 2018-2024V
sales@chinatungsten.com

Partie 3 : Optimisation des performances du carbure cimenté

Chapitre 7 : Contrôle des propriétés mécaniques du carbure cimenté

Le carbure cimenté (WC-Co) est largement utilisé dans les outils aéronautiques (durée de vie de coupe > 15 heures), les forets miniers (perçage > 1200 m) et les matrices résistantes à l'usure (extrusion > 10^6 fois) en raison de son excellente dureté élevée (HV 1200-1800), de sa bonne ténacité à la rupture (K_{IC} 8-16 MPa·m^{1/2}), de sa résistance à la compression élevée (4000-6000 MPa) et de son excellente résistance à l'usure (taux d'usure < 0,1 mm³ / N·m). Cependant, dans des conditions de travail extrêmes, telles que des impacts élevés (fréquence > 500 Hz), des charges cycliques (> 10^5 fois), des températures élevées (> 800 °C) et une usure abrasive (dureté > 800 HV), les performances globales du carbure cimenté restent confrontées à des défis. Il est difficile pour une stratégie d'optimisation unique de répondre simultanément aux exigences synergétiques de dureté, de ténacité, de résistance à la fatigue et de résistance à l'usure. Une percée en matière de performances globales peut être obtenue en contrôlant la microstructure (granulométrie WC 0,2-2 μm, teneur en Co 6 %-15 %), en analysant en profondeur le mécanisme de rupture (taux de croissance des fissures ~10⁻⁶ mm/cycle) et en appliquant une technologie de renforcement avancée (VC additif 0,2 %-0,5 %, dose d'implantation ionique 10¹⁶-10¹⁷ cm⁻², épaisseur de revêtement laser 50-150 μm).

Ce chapitre s'articule autour des quatre axes suivants : l'équilibre entre dureté et ténacité, la résistance à la fatigue et aux chocs, l'analyse des mécanismes de défaillance et la stratégie d'amélioration des performances. Il examine systématiquement les propriétés mécaniques, les avantages et les inconvénients, la technologie de régulation et les conditions d'utilisation du carbure cimenté. Il analyse également les tendances de développement du carbure cimenté dans le contexte de l'IA et de l'Internet des objets industriels (IIoT), offrant ainsi une efficacité et une fiabilité accrues aux applications industrielles.

Les avantages du carbure cimenté sont sa dureté et sa résistance à l'usure élevées, ainsi que sa capacité à supporter des charges et des frottements élevés dans des conditions de travail extrêmes. Cependant, son inconvénient réside dans la contradiction entre dureté et ténacité. Une dureté élevée (HV > 1600) entraîne généralement une diminution de la ténacité (K_{IC} < 10 MPa·m^{1/2}), ce qui est sujet à la rupture fragile. De plus, la résistance à la fatigue du carbure cimenté doit encore être améliorée sous des charges cycliques à haute fréquence (la vitesse de propagation des fissures doit être contrôlée à < 10⁻⁷ mm / cycle). Grâce à l'analyse de ce chapitre, les lecteurs auront une compréhension complète des méthodes de régulation des propriétés mécaniques du carbure cimenté et de ses performances dans les applications pratiques.

7.0 Propriétés mécaniques du carbure cimenté

Le carbure cimenté (WC-Co) est largement utilisé dans l'aéronautique, l'exploitation minière et la fabrication de moules en raison de ses excellentes propriétés mécaniques. Voici une description

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

détaillée de ses principales propriétés mécaniques, incluant sa définition, sa méthode de mesure, ses facteurs d'influence et son contexte d'application :

7.0. 1. Dureté élevée du carbure cimenté

7.0. 1. 0 Quelle est la dureté du carbure cimenté ?

La dureté du carbure cimenté (WC-Co) désigne la capacité de sa surface à résister aux indentations ou aux rayures causées par des objets externes (tels que des pénétrateurs), reflétant ainsi sa résistance à la déformation plastique et à l'usure. Matériau composite, le carbure cimenté est constitué d'une phase dure de carbure de tungstène (WC, dureté d'environ HV 2000-2500) et d'une phase de liaison de cobalt (Co, dureté d'environ HV 300). La dureté du carbure cimenté est généralement comprise entre HV 1200 et 1800, et peut être augmentée jusqu'à HV 2000-2500 par modification de surface (carburation, placage laser, etc.). Le niveau de dureté détermine directement la durabilité du carbure cimenté dans les environnements à fortes charges et frottements, notamment ses performances en découpe, perçage et fabrication de moules.

La nature physique de la dureté est étroitement liée à la microstructure du matériau, ce qui est principalement dû à la dureté élevée et à l'effet de renforcement des joints de grains de la phase WC, tandis que la phase Co absorbe une partie de l'énergie par déformation plastique et ajuste les performances globales.

7.0.1.1 Méthode de mesure de la dureté du carbure cimenté

La dureté du carbure cimenté peut être mesurée par une variété de méthodes d'essai, différentes méthodes conviennent à différents scénarios et exigences de précision :

Dureté Vickers (HV)

Gamme : HV 1200-1800, jusqu'à HV 2000-2500 après modification de surface.

Principe : Utiliser un duromètre Vickers et un pénétrateur pyramidal quadrangulaire en diamant (angle diagonal de 136°), appliquer une charge standard (généralement 30 kg) et calculer la dureté en mesurant la diagonale de l'empreinte. La formule est :

$$HV = \frac{1.8544 \cdot F}{d^2}$$

Où F est la charge (kg) et d est la longueur diagonale de l'indentation (mm).

Avantages : large plage de mesure, haute précision, adapté aux tests de dureté du carbure cimenté et constitue la méthode la plus couramment utilisée .

Application : Utilisé pour évaluer la dureté volumique et la dureté des zones microscopiques telles que les grains ou les revêtements.

Dureté Rockwell (HRA)

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

Gamme : HRA 80-94 (échelle A).

Principe : Utiliser un duromètre Rockwell équipé d'un pénétrateur à cône diamant (angle du cône 120°) et appliquer une charge de 60 kg pour mesurer la profondeur d'indentation.

Avantages : Test rapide, adapté aux tests à grande échelle.

Limitations : Précision légèrement inférieure pour les matériaux ultra-durs (tels que le carbure cémenté), souvent utilisés pour l'évaluation préliminaire.

Dureté Brinell (HB)

Gamme : HB 1000-1600.

Principe : Utiliser un pénétrateur à bille de carbure (10 mm de diamètre), appliquer une charge importante (par exemple 3 000 kg) et calculer la dureté sur la zone d'indentation. La formule est la suivante :

$$HB = \frac{2F}{\pi D(D - \sqrt{D^2 - d^2})}$$

7.0.1.2 Facteurs affectant la dureté

La dureté du carbure cémenté est influencée par diverses microstructures et paramètres de procédé. Voici une analyse détaillée des principaux facteurs :

(1) Granulométrie WC

effet : 晶粒尺寸越小，硬度越高，遵循 Hall-Petch 关系 ($\sigma_y = \sigma_0 + k \cdot d^{-1/2}$)，其中 σ_y 为屈服强度， d 为晶粒尺寸， k 为常数 (约 0.3 MPa·m^{1/2})。硬度与屈服强度近似正比 ($HV \approx 3\sigma_y$)。

Lorsque la taille des grains diminue de 2 µm à 0,5 µm, la dureté augmente de HV 1200 à HV 1600, soit une augmentation d'environ 25 à 30 %. Si la taille des grains est encore réduite à < 0,2 µm, la dureté peut atteindre HV 1800, mais la ténacité peut diminuer en raison du glissement des joints de grains.

mécanisme Les petits grains augmentent la densité des joints de grains (>10¹³ m⁻²), empêchant le mouvement des dislocations et augmentant ainsi la dureté.

(2) Contenu Co

Effet : Le Co est une phase molle (dureté d'environ HV 300), et l'augmentation de sa teneur réduira la dureté du carbure cémenté.

Données : Lorsque la teneur en Co est de 6 à 8 %, la dureté est de HV 1600 à 1800 ; lorsque la teneur en Co est de 12 à 15 %, la dureté tombe à HV 1200 à 1400.

Mécanisme : Lorsque la teneur en Co est élevée, la fraction volumique de WC diminue (la proportion de WC passe de 90% à 70%), et la résistance à la déformation de la phase dure diminue.

(3) Additifs

Effet : Des additifs tels que le VC (carbure de vanadium) ou le Cr₃C₂ peuvent inhiber la croissance des grains et augmenter la dureté.

Données : L'ajout de 0,2 % à 0,5 % de VC peut augmenter la dureté de 5 % à 10 %, jusqu'à HV

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

2000. Si la quantité ajoutée est $> 0,8 \%$, des phases cassantes (telles que VCx) peuvent se former, ce qui réduira les performances.

Mécanisme : Le VC inhibe la croissance des grains et réduit le taux de migration des joints de grains ($< 10^{-10}$ m/s) par renforcement par solution solide et précipitation (formant une fine couche de VCx d'une épaisseur de < 20 nm).

(4) Modification de surface

Effet : Améliorer la dureté de surface grâce à des techniques telles que la cémentation, l'implantation ionique ou le revêtement laser.

Données : La cémentation forme une couche riche en WC (épaisseur $10-30 \mu\text{m}$) avec une dureté allant jusqu'à HV 2000-2200 ; le revêtement laser forme une couche de haute dureté (épaisseur $50-100 \mu\text{m}$) avec une dureté allant jusqu'à HV 2500.

Mécanisme : La modification de surface introduit une phase de dureté élevée (comme WC ou CrN) et une contrainte de compression résiduelle (> 400 MPa) pour améliorer la résistance à la déformation.

(5) Procédé de frittage

Effet : La température et l'atmosphère de frittage affectent la croissance des grains et la microstructure.

Données : Lorsque la température de frittage est de $1400-1500^\circ\text{C}$ et le degré de vide est $< 10^{-2}$ Pa, la taille des grains peut être contrôlée à $< 0,8 \mu\text{m}$ et la dureté atteint HV 1600. Si la température est $> 1550^\circ\text{C}$ et la taille des grains est $> 2 \mu\text{m}$, la dureté diminue de 10%-15%.

Mécanisme : La température élevée provoque la croissance des grains et réduit l'effet de renforcement des limites des grains.

Mécanisme microscopique de la dureté

Le mécanisme microscopique de la dureté du carbure cémenté repose principalement sur les aspects suivants :

(1) Dureté élevée de la phase WC

Le WC (carbure de tungstène) est un matériau ultra-dur dont la dureté peut atteindre HV 2000-2500, en raison de sa structure de liaison covalente (énergie de liaison WC ~ 800 kJ/mol) et de son module élevé ($E \approx 700$ GPa). La phase WC représente 70 à 90 % de la fraction volumique du carbure cémenté et constitue la principale source de dureté.

(2) Renforcement des joints de grains (effet Hall-Petch)

晶粒尺寸减小增加晶界密度，晶界通过钉扎位错（Orowan 强化， $\tau \sim Gb/\lambda$, $\lambda < 1 \mu\text{m}$ ）阻碍位错运动，提高硬度和强度。晶界迁移速率（ $< 10^{-10}$ m/s）受添加剂和烧结温度控制，迁移能障约为 80-120 kJ/mol。

(3) Effet régulateur de la phase Co

La phase Co (faible dureté, HV ≈ 300) absorbe une partie de l'énergie par déformation plastique

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

(taux de déformation $\sim 10^{-3} \text{ s}^{-1}$) et réduit la concentration de contrainte, mais une teneur élevée en Co réduira la proportion de phase WC et réduira la dureté globale.

(4) Effet d'interface

La force de liaison de l'interface ($> 50 \text{ MPa}$) entre le WC et le Co a une influence importante sur la dureté. La mouillabilité du Co sur le WC (angle de contact $< 15^\circ$) assure une faible énergie d'interface ($< 1,5 \text{ J/m}^2$), mais si la distribution du Co est inégale (écart $> 1\%$), des flaques de Co (taille $> 5 \mu\text{m}$) peuvent se former, réduisant la dureté.

(5) Stabilité thermodynamique

La stabilité thermodynamique du WC à grains fins est évaluée par l'énergie libre de Gibbs ($\Delta G < 0$). Lorsque la taille des grains est $< 0,5 \mu\text{m}$, l'énergie d'interface ($> 1,5 \text{ J/m}^2$) domine les changements de propriétés et peut induire des microfissures (longueur $0,05\text{-}0,1 \mu\text{m}$), affectant la dureté.

7.0.1.4 Importance de la dureté dans l'application

La dureté élevée du carbure cimenté constitue son principal avantage dans les applications industrielles, notamment dans les scénarios suivants :

Outils d'aviation

Exigences : Vitesse de coupe $> 800 \text{ m/min}$, charge et frottement élevés.

Performance : La durée de vie de coupe d'un outil WC-10Co d'une dureté HV 1600 peut atteindre 15 heures, soit 25% de plus que celle d'un matériau d'une dureté HV 1200.

Mécanisme : La dureté élevée réduit le taux d'usure de l'outil ($< 0,1 \text{ mm}^3 / \text{N} \cdot \text{m}$) et prolonge la durée de vie de l'outil.

Trépan de forage minier

Exigences : Forage de roche dure (dureté de la roche $> 800 \text{ HV}$), résistance élevée au frottement et aux chocs requise.

Performances : Foret WC-8Co avec dureté HV 1700, distance de perçage $> 1200 \text{ m}$, soit une augmentation de 40%.

Mécanisme : La dureté élevée réduit l'usure abrasive (largeur de rainure $< 10 \mu\text{m}$) et améliore la durabilité.

Moule résistant à l'usure

Exigences : Extrusion haute fréquence ($> 10^6$ fois), résistance à l'usure et à la déformation.

Performances : Filière WC-12Co avec dureté HV 1600, temps d'extrusion $> 10^6$ fois.

Mécanisme : La dureté élevée garantit la capacité de la surface du moule à résister à l'indentation et prolonge sa durée de vie.

Conditions de température élevée

Demande : Découpe à haute température ($> 800^\circ\text{C}$), comme le traitement des aubes de turbines

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

d'aviation.

Performances : Le carbure de dureté HV 2000 (après cémentation) a une durée de vie de 20 heures, soit une augmentation de 30%.

Mécanisme : La dureté élevée et la couche d'oxyde (WO_3 , épaisseur $\sim 2 \mu\text{m}$) réduisent conjointement l'usure à haute température.

7.0.1.5 Compromis entre dureté et ténacité

- écart entre la dureté et la ténacité (K_{1c}) du carbure cémenté :

Une dureté élevée ($\text{HV} > 1600$) s'accompagne généralement d'une faible ténacité ($K_{1c} < 10 \text{ MPa}\cdot\text{m}^{1/2}$), ce qui peut facilement conduire à une rupture fragile en raison de grains fins ($< 0,2 \mu\text{m}$) ou d'une faible teneur en Co ($< 6\%$).

Une ténacité élevée ($K_{1c} > 12 \text{ MPa}\cdot\text{m}^{1/2}$) nécessite d'augmenter la teneur en Co ($> 12\%$) ou la taille des grains ($1-2 \mu\text{m}$), mais la dureté diminuera ($\text{HV} < 1400$), affectant la résistance à l'usure.

Les stratégies d'optimisation comprennent :

La granulométrie sélectionnée est de $0,5$ à $1 \mu\text{m}$, la teneur en Co est de 8 à 12% , la dureté est HV 1500 à 1600 , K_{1c} 12 à $14 \text{ MPa}\cdot\text{m}^{1/2}$.

L'ajout de VC/ TaC ($0,2\%$ à $0,5\%$) peut augmenter la dureté de 3 à 5% tout en maintenant la ténacité.

Adopte une structure à gradient (surface Co 6% , interne 12%), dureté de surface HV 1600 , interne K_{1c} $14 \text{ MPa}\cdot\text{m}^{1/2}$.

7.0.1.6 Résumé

La dureté du carbure cémenté est le principal indicateur de sa résistance à la déformation et à l'usure, avec une plage typique de HV $1200-1800$ et un maximum de HV 2500 . Cette dureté est principalement due à la dureté élevée et au renforcement des joints de grains de la phase WC, et est influencée par des facteurs tels que la granulométrie, la teneur en Co, les additifs et les modifications de surface. En optimisant la microstructure et les paramètres de procédé, le carbure cémenté peut démontrer une excellente durabilité et fiabilité dans des secteurs tels que l'aéronautique, l'exploitation minière et la fabrication de moules. À l'avenir, l'utilisation de l'IA et de l'Internet industriel des objets (IIoT) permettra d'améliorer encore la constance de la dureté et l'efficacité de l'optimisation des performances.

7.0. 2. Ténacité à la rupture du carbure cémenté

La ténacité à la rupture du carbure cémenté (WC-Co) est sa capacité à résister à la propagation des fissures et à la rupture. C'est un indicateur clé pour évaluer la fiabilité des matériaux soumis à de fortes contraintes ou à des chocs. Voici une explication détaillée de la définition, de la méthode de mesure, des facteurs d'influence, du mécanisme microscopique et de l'importance de l'application.

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

7.0.2.1. Définition de la ténacité à la rupture du carbure cimenté

La ténacité à la rupture (K_{Ic}) est la capacité du carbure cimenté à résister à la propagation des fissures en présence de fissures ou de défauts. Son unité est le $\text{MPa} \cdot \text{m}^{1/2}$. La plage de ténacité du carbure cimenté est généralement comprise entre 8 et 16 $\text{MPa} \cdot \text{m}^{1/2}$, ce qui reflète sa résistance à la rupture fragile sous forte charge ou impact. La ténacité à la rupture dépend principalement de la capacité de déformation plastique de la phase de liaison Co et de l'effet de renforcement des joints de grains de la phase WC, reflétant l'équilibre entre dureté et ténacité du carbure cimenté.

7.0.2.2. Méthode de mesure de la ténacité à la rupture du carbure cimenté

La ténacité à la rupture est généralement mesurée par des méthodes d'essai normalisées. Les méthodes courantes sont les suivantes :

Poutre à encoche simple (SENB)

Principe : Préfabriquer une entaille en V ou à bord droit sur l'échantillon, appliquer une charge de flexion trois points et mesurer la contrainte maximale avant expansion de la fissure. La formule est :

原理：在试样上预制 V 型或直边缺口，采用三点弯曲加载，测量裂纹扩展前的最大应力。公式为：

$$K_{Ic} = \frac{P \cdot S}{B \cdot W^{3/2}} \cdot f\left(\frac{a}{W}\right)$$

其中 P 为载荷， S 为支座间距， B 和 W 分别为试样厚度和宽度， a 为裂纹长度， $f\left(\frac{a}{W}\right)$ 为几何修正因子。

Conditions : La taille de l'échantillon est généralement de $55 \times 10 \times 10$ mm et la profondeur de l'encoche est d'environ 2 mm.

Avantages : Convient pour une mesure précise du carbure cimenté, largement utilisé dans les normes industrielles.

Méthode d'indentation

de K_{Ic} à partir de la longueur de fissure de l'indentation de dureté Vickers, basée sur une formule empirique pour la croissance des fissures.

Avantages : Pas besoin de préparation d'échantillon compliquée, adapté aux tests rapides.

Limitations : Faible précision, convient à une évaluation préliminaire.

D'autres méthodes, telles que la méthode de la poutre en porte-à-faux double (DCB) ou la méthode de tension compacte (CT), conviennent à des scénarios de recherche spécifiques.

La méthode SENB est devenue la méthode courante pour les tests de ténacité à la fracture du carbure cimenté en raison de sa grande précision et de sa standardisation.

7.0.2.3. Facteurs affectant la ténacité à la rupture du carbure cimenté

Le niveau de ténacité à la rupture est affecté par une variété de paramètres microstructuraux et de processus, comme suit :

Contenu Co

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

Effet : Le cobalt, en tant que phase tenace, absorbe l'énergie de fissuration par déformation plastique. Plus la teneur est élevée, meilleure est la ténacité.

Données : Lorsque la teneur en Co est de 6 %, K_{Ic} est d'environ $8 \text{ à } 10 \text{ MPa} \cdot \text{m}^{1/2}$; lorsque la teneur en Co est de 12 à 15 %, K_{Ic} peut atteindre $14 \text{ à } 16 \text{ MPa} \cdot \text{m}^{1/2}$.

Mécanisme : L'augmentation de la teneur en Co ($> 10\%$) améliore la dissipation plastique (taux de déformation $\sim 10^{-3} \text{ s}^{-1}$) mais réduit la dureté ($\text{HV} < 1400$).

Taille des grains

Effet : La taille des grains a un double effet sur la ténacité, et une taille modérée optimise les performances.

Lorsque les grains sont grossiers (tels que $1\text{-}2 \mu\text{m}$), $K_{Ic} > 12 \text{ MPa} \cdot \text{m}^{1/2}$; lorsque les grains sont trop fins (tels que $< 0,2 \mu\text{m}$), $K_{Ic} < 8 \text{ MPa} \cdot \text{m}^{1/2}$ en raison du glissement des joints de grains (vitesse $\sim 10^{-9} \text{ m/s}$).

Mécanisme : Les grains grossiers réduisent la densité des joints de grains ($< 10^{13} \text{ m}^{-2}$), réduisant ainsi la résistance à la propagation des fissures ; les grains excessivement fins augmentent les défauts des joints de grains, qui peuvent facilement provoquer des microfissures.

additif

Effet : Les additifs peuvent renforcer les joints de grains ou optimiser la microstructure et améliorer la ténacité.

Données : Ajout de TaC ($0,2\%$ - $0,5\%$) peut augmenter K_{Ic} d'environ 5% à 10% ; l'ajout de VC ($> 0,8\%$) peut former une phase cassante et réduire la ténacité.

Mécanisme : Le TaC améliore la résistance de liaison des joints de grains ($> 150 \text{ MPa}$) et réduit la fracture intergranulaire.

Procédé de frittage

Effet : La température et le temps de frittage affectent la distribution du Co et la stabilité des joints de grains.

Données : Lorsque la température de frittage est de $1400\text{-}1500^\circ\text{C}$ et le temps de frittage est de 1 à 3 heures, K_{Ic} est stable à $12\text{-}14 \text{ MPa} \cdot \text{m}^{1/2}$; si $> 1550^\circ\text{C}$, le taux de ségrégation de Co est $> 1\%$ et K_{Ic} diminue de 5% - 10% .

Mécanisme : Une température élevée conduit à la formation d'un pool de Co (taille $> 5 \mu\text{m}$), ce qui réduit la ténacité.

7.0.2.4. Mécanisme microscopique de la ténacité à la rupture du carbure cémenté

Le mécanisme microscopique de la ténacité à la rupture comprend principalement les aspects suivants :

Déformation plastique de la phase Co La phase Co absorbe l'énergie de la fissure par déformation plastique (déformation $\sim 0,05\%$ - $0,1\%$) et retarde la propagation de la fissure.

Lorsque la

teneur en Co est de 10% , la dissipation plastique est importante et K_{Ic} peut atteindre $12 \text{ MPa} \cdot \text{m}^{1/2}$.

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

Déflexion des fissures aux joints de grains WC

Les joints de grains WC ($0,5-1 \mu m$) augmentent la longueur du chemin de propagation des fissures et réduisent la vitesse de propagation des fissures ($< 10^{-2} m/s$) par déflexion des fissures (angle $20^\circ-40^\circ$). L'effet de déflexion est plus prononcé dans les grains grossiers ($> 1 \mu m$).

l'

interface ($> 50 MPa$) entre WC et Co est obtenue par mouillage du Co (angle de contact $< 15^\circ$), et l'énergie de l'interface est $< 1,5 J/m^2$. S'il y a beaucoup de défauts d'interface ($> 0,5 \%$), la ténacité diminue.

de suppression de microfissures

(tels que TaC) inhibent l'initiation de microfissures (longueur $< 0,05 mm$) grâce au renforcement de la solution solide (espacement des joints de grains $< 0,2 \mu m$), augmentant K_{Ic} de 5 à 10 %.

7.0.2.5. Importance de la ténacité à la rupture du carbure cémenté pour l'application

La ténacité à la rupture est cruciale dans l'application pratique du carbure cémenté, en particulier dans les scénarios de charges à fort impact et cycliques :

Outils d'aviation

Exigences : Vitesse de coupe $> 800 m/min$, doit résister à des impacts élevés et à des charges cycliques.

Performances : outil WC-8Co avec $K_{Ic} 12 MPa \cdot m^{1/2}$, durée de vie > 15 heures.

Mécanisme : La ténacité élevée réduit la croissance des fissures (taux $< 10^{-6} mm/cycle$) et prolonge la durée de vie.

Trépans de forage minier

Exigences : Forage de roche dure (fréquence $> 500 Hz$), haute résistance aux chocs requise.

Performances : foret WC-10Co avec $K_{Ic} 13 MPa \cdot m^{1/2}$, distance de perçage $> 1200 m$.

Mécanisme : Sa haute ténacité absorbe l'énergie d'impact ($> 18 J$) et réduit le risque de fracture.

Moule résistant à l'usure

Exigences : Extrusion à haute fréquence ($> 10^6$ fois), résistance à la rupture par fatigue requise.

Propriétés : Filière WC-12Co avec $K_{Ic} 14 MPa \cdot m^{1/2}$, temps d'extrusion $> 10^6$.

Mécanisme : La haute ténacité retarde la croissance des microfissures (longueur $< 0,1 mm$).

Conditions de haute mer

Exigences : Pression $> 80 MPa$, résistance à la corrosion sous contrainte requise.

Propriétés : Carbure à structure gradient avec $K_{Ic} 14 MPa \cdot m^{1/2}$, durée de vie > 4 ans.

Mécanisme : La ténacité élevée et la protection de surface réduisent la propagation des fissures de corrosion.

7.0.2.6. Optimisation et développement futur de la ténacité à la rupture du carbure cémenté

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

Pour améliorer la ténacité à la rupture, les stratégies suivantes peuvent être utilisées :

Optimisation de la microstructure : sélectionnez une granulométrie de 0,5 à 1 μm , une teneur en Co de 10 à 12 %, K_{Ic} peut atteindre 12 à 14 $\text{MPa}\cdot\text{m}^{1/2}$.

Contrôle additif : l'ajout de 0,2 à 0,5 % de TaC peut augmenter K_{Ic} de 5 à 10 %.

Renforcement de surface : Appliquer un revêtement TiN (épaisseur 1-3 μm) pour réduire l'initiation des fissures de surface et augmenter K_{Ic} de 5 à 10 %.

IA et IIoT : utiliser l'IA pour prédire la distribution du Co et la stabilité des joints de grains (erreur < 0,2 %), et combiner l'IIoT pour surveiller la propagation des fissures en temps réel (précision $\pm 0,02\text{ mm}$) et améliorer la cohérence de la ténacité (écart < 0,5 $\text{MPa}\cdot\text{m}^{1/2}$) .

La ténacité à la rupture est au cœur de l'optimisation des performances du carbure cimenté, notamment dans des conditions de travail extrêmes. En optimisant la microstructure et les paramètres de procédé, le carbure cimenté répond aux besoins d'applications exigeantes telles que l'aviation, l'exploitation minière et la haute mer. À l'avenir, l'intégration de l'IA et des technologies de l'Internet des objets industriel favorisera l'amélioration de la ténacité et le développement des applications.

7.0. 3. Résistance à la compression du carbure cimenté

La résistance à la compression du carbure cimenté (WC-Co) est un indicateur important des propriétés mécaniques de son aptitude à résister aux dommages sous compression, reflétant sa capacité à résister à la déformation par compression et à la rupture fragile. Voici une explication détaillée de la définition, de la méthode de mesure, des facteurs d'influence, du mécanisme microscopique, de l'importance de l'application, de l'optimisation et des développements futurs. Des détails et des données supplémentaires sont ajoutés pour approfondir l'analyse.

7.0.3.1. Définition de la résistance à la compression du carbure cimenté

La résistance à la compression est la contrainte maximale avant rupture du matériau sous une charge de compression unidirectionnelle du carbure cimenté. Elle est mesurée en MPa et se situe généralement entre 4 000 et 6 000 MPa. La résistance à la compression est un paramètre clé du carbure cimenté sous forte charge. Elle est principalement soutenue par le module ultra-élevé (environ 700 GPa) et l'effet de renforcement des joints de grains de la phase dure du carbure de tungstène (WC), tout en étant régulée par les propriétés plastiques de la phase de liaison du cobalt (Co). Le niveau de résistance à la compression détermine directement la fiabilité et la durabilité du carbure cimenté dans les environnements à pression extrême (tels que les eaux profondes ou la coupe à grande vitesse). Par exemple, la résistance à la compression de l'alliage WC-10Co est généralement comprise entre 4 500 et 5 000 MPa, et sa valeur spécifique varie en fonction de la microstructure et des paramètres du procédé.

7.0.3. 2. Méthode de mesure de la résistance à la compression du carbure cimenté

La résistance à la compression est déterminée par un essai de compression standardisé, dont voici les méthodes spécifiques et les détails pertinents :

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

Essai de compression

Principe : Utiliser une machine d'essai universelle ou une machine d'essai de compression spéciale pour appliquer une charge de compression unidirectionnelle sur une éprouvette cylindrique ou cubique jusqu'à ce qu'elle subisse une déformation plastique ou une rupture fragile, et enregistrer la contrainte maximale. La formule est :

$$\sigma_c = \frac{F}{A}$$

其中 σ_c 为抗压强度 (MPa) , F 为破坏时的最大载荷 (N) , A 为试样初始截面面积 (mm²) 。

Conditions de test :

Géométrie de l'échantillon : cylindrique (10 mm de diamètre, 20 mm de hauteur) ou cubique (10 × 10 × 10 mm), avec un rapport diamètre/hauteur généralement de 1:2 pour éviter les effets de tonneau.
Taux de chargement : 0,5-1 mm/min, chargez lentement pour assurer une répartition uniforme des contraintes.

Conditions environnementales : température ambiante (20-25°C), humidité <50%, éviter les interférences des facteurs environnementaux.

Avantages : Reflète directement la limite de portance du matériau sous compression et les résultats des tests sont fortement corrélés avec les scénarios d'application réels.

Limitations : L'échantillon doit être exempt de défauts initiaux (par exemple porosité < 1%), sinon le résultat sera faible ; la géométrie de l'échantillon et les effets de frottement peuvent introduire des erreurs, nécessitant l'application de lubrifiants ou de facteurs de correction.

Technologie supplémentaire : La combinaison de jauges de contrainte pour mesurer les contraintes transversales et longitudinales et calculer le coefficient de Poisson ($\nu \approx 0,2-0,25$) vérifie davantage les performances de compression.

La méthode d'essai de compression est une méthode standard pour mesurer la résistance à la compression du carbure cimenté et est largement utilisée dans l'industrie et la recherche scientifique.

7.0.3.3. Facteurs affectant la résistance à la compression du carbure cimenté

La résistance à la compression est influencée par de nombreux facteurs, notamment la microstructure, le rapport de composition et le procédé de préparation. L'analyse spécifique est la suivante :

Granulométrie du WC

Effet : Le raffinement du grain améliore la résistance à la compression en augmentant la densité des joints de grains.

Données : Lorsque la taille des grains est affinée de 2 μm à 0,2-0,5 μm , la résistance à la compression augmente de 4 000 MPa à > 4 500 MPa, voire jusqu'à 5 000 MPa ; si la taille des grains est > 2 μm , la résistance à la compression chute à 3 500-4 000 MPa.

Mécanisme : Grains fins (<0,5 μm) selon la relation Hall-Petch

机理: 细小晶粒 (<0.5 μm) 依据 Hall-Petch 关系 ($\sigma_y = \sigma_0 + k \cdot d^{-1/2}$, $k \approx 0.3 \text{ MPa} \cdot \text{m}^{1/2}$)

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

Améliore la limite d'élasticité, la densité des joints de grains $> 10^{13} \text{ m}^{-2}$ empêche efficacement le mouvement de dislocation.

Limite : Des grains trop fins ($< 0,2 \mu\text{m}$) peuvent provoquer l'apparition de microfissures en raison de défauts accrus aux joints de grains ($> 0,5\%$), et la résistance à la compression peut diminuer de 5 à 10 %.

Contenu Co

Effet : Une teneur en Co trop élevée affaiblira la résistance à la compression.

Données : Lorsque la teneur en Co est de 8 à 12 %, la résistance à la compression est stable à 4 500 à 5 000 MPa ; lorsque la teneur en Co est $> 15\%$, la résistance à la compression chute à $< 3 500$ MPa ; lorsque la teneur en Co est $< 6\%$, la résistance à la compression peut atteindre 5 000 à 6 000 MPa, mais la ténacité diminue ($K_{Ic} < 10 \text{ MPa} \cdot \text{m}^{1/2}$).

Mécanisme : Le cobalt est une phase molle (dureté $\text{HV} \approx 300$). Une teneur élevée ($> 15\%$) réduit la fraction volumique de WC ($< 70\%$), ramollit le matériau et réduit la portance en compression. Une faible teneur en cobalt augmente le rapport de phase WC, mais est sujette à la rupture fragile.

Plage d'optimisation : une teneur en Co de 10 % est considérée comme la meilleure valeur pour l'équilibre entre résistance à la compression et ténacité.

Microstructure

Effet : La microstructure homogène améliore considérablement les propriétés de compression.

Données : Lorsque la densité des joints de grains est $> 10^{13} \text{ m}^{-2}$ et la porosité est $< 1\%$, la résistance à la compression est $> 5 000$ MPa ; si le taux de défauts aux joints de grains est $> 2\%$ ou la porosité est $> 2\%$, la résistance à la compression diminue de 10 à 15 %.

机理：均匀分布的 WC 相和 Co 相减少应力集中，晶界通过 Orowan 强化 ($\tau \sim Gb/\lambda$, $\lambda < 1 \mu\text{m}$) 钉扎位错，增强抗压能力；孔隙或缺陷（如尺寸 $> 5 \mu\text{m}$ ）成为应力集中源，降低强度。

Influence du processus : Le pressage isostatique à froid (CIP, pression 200-300 MPa) peut augmenter la densité à $> 99\%$, améliorant considérablement la résistance à la compression.

7.0.3.4. Micromécanisme de la résistance à la compression du carbure cémenté

Le mécanisme microscopique de la résistance à la compression implique les aspects suivants :

Module élevé de la phase WC

Le module d'élasticité de la phase WC ($E \approx 700 \text{ GPa}$) fournit une base de résistance à la compression élevée et résiste à la déformation par compression. La fraction volumique de WC de 70 à 90 % est la principale source de résistance à la compression, et sa structure de liaison covalente (énergie de liaison WC $\sim 800 \text{ kJ/mol}$) assure d'excellentes performances en compression.

Renforcement des joints de grains

Une densité élevée des joints de grains ($> 10^{13} \text{ m}^{-2}$) empêche le mouvement des dislocations par le mécanisme de renforcement d'Orowan. Lorsque la taille des grains est $< 0,5 \mu\text{m}$, l'effet de renforcement est significatif et la résistance à la compression peut augmenter de 20 à 30 %. La vitesse de migration des joints de grains ($< 10^{-10} \text{ m/s}$) est contrôlée par la température de frittage.

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

(1400-1500 °C).

Régulation plastique de la

phase Co La phase Co (dureté HV ≈ 300) absorbe l'énergie de compression par déformation plastique (taux de déformation $\sim 10^{-3} \text{ s}^{-1}$) et prévient la rupture fragile. À 10% de teneur en Co, la dissipation plastique optimise l'équilibre entre résistance à la compression et ténacité.

Stabilité de l'interface

La force de liaison interfaciale ($> 50 \text{ MPa}$) entre WC et Co est obtenue par le mouillage du Co (angle de contact $< 15^\circ$) et l'énergie interfaciale $< 1,5 \text{ J/m}^2$. S'il y a beaucoup de défauts interfaciaux ($> 0,5 \%$), tels que des flaques de Co (taille $> 5 \mu\text{m}$), la résistance à la compression diminue de 10 à 15 %.

Effet de la contrainte thermique

La vitesse de refroidissement du frittage ($3-5^\circ\text{C/min}$) contrôle la contrainte thermique ($< 100 \text{ MPa}$). Un refroidissement trop rapide ($> 10^\circ\text{C/min}$) peut introduire des microfissures et réduire la résistance à la compression de 5 à 10 %.

7.0.3.5. Importance de la résistance à la compression du carbure cémenté pour l'application

Grâce à sa résistance élevée à la compression, le carbure cémenté est largement utilisé sous fortes charges et dans des environnements extrêmes. Voici une analyse détaillée de scénarios spécifiques :

Outils d'aviation

Exigences : Résiste à une pression locale $> 4\,000 \text{ MPa}$ pendant la coupe, nécessitant une résistance à la compression élevée pour maintenir l'intégrité des bords.

Performances : Les outils WC-10Co avec une résistance à la compression de $5\,000 \text{ MPa}$ ont une durée de vie de > 15 heures à des vitesses de coupe $> 800 \text{ m/min}$, ce qui est 25 % supérieur aux matériaux avec une résistance à la compression de $4\,000 \text{ MPa}$.

Mécanisme : La résistance à la compression élevée réduit la déformation par compression des bords (déformation $< 0,1 \%$), garantissant la précision de coupe et la durabilité.

Forage en haute mer

Exigences : Travailler dans un environnement sous-marin avec une pression $> 80 \text{ MPa}$, devoir résister à des charges de compression élevées et à la corrosion de l'eau de mer.

Performances : foret WC-8Co avec résistance à la compression de $5\,500 \text{ MPa}$, distance de perçage $> 1\,500 \text{ m}$, résistance à la pression améliorée de 40 % et durée de vie prolongée à 5 ans.

Mécanisme : Haute résistance à la compression pour supporter les hautes pressions des grands fonds ($> 80 \text{ MPa}$), combinée à un revêtement CrN (épaisseur $2-4 \mu\text{m}$) pour réduire les effets de la corrosion.

Moule résistant à la pression

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

Copyright© 2024 CTIA All Rights Reserved
标准文件版本号 CTIAQCD-MA-E/P 2024 版
www.ctia.com.cn

电话/TEL: 0086 592 512 9696
CTIAQCD-MA-E/P 2018-2024V
sales@chinatungsten.com

Exigences : L'extrusion à haute fréquence ($> 10^6$ fois) doit résister à une pression locale élevée ($> 5\,000$ MPa) pour éviter toute déformation ou rupture.

Performances : filière WC-12Co avec une résistance à la compression de $6\,000$ MPa, temps d'extrusion $> 10^6$ fois, 30 % plus élevés que la filière avec une résistance à la compression de $4\,500$ MPa.

Mécanisme : La résistance élevée à la compression réduit les indentations de surface du moule (profondeur $< 0,5\,\mu\text{m}$) et prolonge la durée de vie.

Conditions de température élevée

Exigences : La découpe à haute température ($> 800\,^{\circ}\text{C}$) nécessite une résistance aux contraintes thermiques, comme le traitement des aubes de turbines d'aviation.

Performances : Carbure cimenté à structure gradient (6% Co en surface, 12% à l'intérieur) avec une résistance à la compression de 4500 MPa, durée de vie > 4000 heures à 850°C , 35% supérieure aux matériaux ordinaires.

Mécanisme : Haute résistance à la compression combinée à une couche d'oxyde (WO_3 , épaisseur $\sim 2\,\mu\text{m}$) pour résister à la compression à haute température et réduire les contraintes thermiques (< 150 MPa).

7.0.3.6. Optimisation et développement futur de la résistance à la compression du carbure cimenté

Pour améliorer encore la résistance à la compression, les stratégies suivantes peuvent être adoptées :

Optimisation de la microstructure :

La granulométrie est de $0,2$ à $0,5\,\mu\text{m}$ et la résistance à la compression peut atteindre $5\,000$ à $6\,000$ MPa grâce au broyage à billes à haute énergie (vitesse 300 à 500 tr/min, durée 20 à 40 heures).

La teneur en Co est contrôlée entre 8 et 12% pour assurer un équilibre entre résistance à la compression et ténacité ($K_{Ic} > 12\,\text{MPa}\cdot\text{m}^{1/2}$).

Contrôle additif :

L'ajout de $0,2$ à $0,5\%$ de VC ou de Cr_3C_2 peut augmenter la résistance aux joints de grains de 5 à 10% et la résistance à la compression de 3 à 5% .

Eviter les ajouts $> 0,8\%$ pour éviter la formation de phases cassantes (ratios $> 0,5\%$).

Renforcement de surface :

L'application d'un revêtement CrN (épaisseur $2-4\,\mu\text{m}$, dureté HV $3000-3500$) peut améliorer la résistance à la compression de la surface et augmenter la résistance de 5 à 10% .

Le revêtement laser (puissance $1,5-2,5\,\text{kW}$, épaisseur $50-100\,\mu\text{m}$) forme une couche de haute dureté, ce qui améliore la résistance à la compression de 10 à 15% .

Optimisation des processus :

Température de frittage $1400-1500^{\circ}\text{C}$, degré de vide $< 10^{-2}$ Pa, densité $> 99\%$, porosité $< 1\%$.

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

Le pressage isostatique à froid (CIP, pression 200-300 MPa) augmente la densité et la résistance à la compression de 5 à 10 %.

IA et IIoT :

L'IA a été utilisée pour prédire la densité des joints de grains et la distribution du Co (erreur < 0,2 %), et les paramètres de broyage à boulets ont été optimisés sur la base de données historiques (précision $\pm 0,5$ h).

Associé à l'IIoT, une surveillance en temps réel de la distribution des contraintes (précision ± 10 MPa) et de la taille des grains (écart < 0,005 μ m) peut être obtenue pour améliorer la cohérence de la résistance à la compression (écart < 2%).

Le 1er juin 2025, l'équipe xAI développe un modèle d'optimisation de compression basé sur l'apprentissage profond (DNN), qui devrait augmenter la précision de prédiction de la résistance à la compression à ± 50 MPa, aidant ainsi à la conception des forets en eaux profondes.

La résistance à la compression est la principale performance du carbure cimenté sous fortes charges. Grâce à l'optimisation de la microstructure, des paramètres de procédé et des technologies émergentes, il peut répondre aux besoins d'applications exigeantes telles que l'aéronautique, la haute mer et la fabrication de moules. Grâce à l'application approfondie de l'IA et de l'Internet industriel des objets (IIoT), les performances en compression et l'efficacité de production du carbure cimenté seront encore améliorées, et des avancées significatives devraient être réalisées dans les deux à trois prochaines années.

7.0.4. Résistance à l'usure du carbure cimenté

La résistance à l'usure du carbure cimenté (WC-Co) se caractérise par sa capacité à résister à la perte de matière superficielle et à l'usure. C'est un indicateur de performance clé pour mesurer la durabilité des matériaux dans des environnements à frottement élevé ou abrasifs. Voici une explication détaillée de la définition, de la méthode de mesure, des facteurs d'influence, du mécanisme microscopique, de l'importance de l'application, de l'optimisation et des développements futurs.

7.0.4.1. Définition de la résistance à l'usure du carbure cimenté

La résistance à l'usure est la capacité du carbure cimenté à résister à l'usure superficielle sous l'effet du frottement, de l'abrasion ou des charges de contact. Elle est généralement mesurée par le taux d'usure (unité : $\text{mm}^3/\text{N} \cdot \text{m}$) ou le volume d'usure. Le carbure cimenté est largement utilisé dans les applications à forte usure grâce à son excellente résistance à l'usure, principalement due à la dureté élevée (environ HV 2000-2500) de la phase dure, le carbure de tungstène (WC), et à la ténacité apportée par la phase de liaison, le cobalt (Co). La résistance à l'usure influence directement la durée de vie du carbure cimenté dans les applications de coupe, de perçage et de fabrication de moules.

7.0.4.2. Méthode de mesure de la résistance à l'usure du carbure cimenté

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

La résistance à l'usure est généralement déterminée par des tests d'usure normalisés. Voici les méthodes courantes et les détails pertinents :

Essai d'abrasion par écoulement de sable (ASTM G65)

Principe : Utiliser un flux de sable comme abrasif, appliquer une charge pour simuler l'usure abrasive et mesurer la perte de volume de l'échantillon après usure. La formule de calcul du taux d'usure est la suivante :

$$W_r = \frac{V}{F \cdot L}$$

Où W_r est le taux d'usure ($\text{mm}^3 / \text{N} \cdot \text{m}$) , V est le volume d'usure (mm^3) , F est la charge (N) et L est la distance de glissement (m).

Conditions de test :

Grain : SiO_2 (dureté > 800 HV).

Vitesse de glissement : 1-2 m/s, durée 30-60 minutes.

Environnement : Température ambiante (20-25°C), humidité <50%.

Avantages : Il simule les conditions réelles d'usure abrasive et les résultats des tests sont très pertinents pour les applications industrielles.

Limitations : La taille des particules et l'uniformité du sable doivent être contrôlées et les résultats des tests sont affectés par le coefficient de frottement.

Essai d'usure des broches sur le disque (ASTM G99)

Principe : L'échantillon agit comme une broche en contact avec un disque rotatif, une charge est appliquée et la perte de masse ou la profondeur après usure est mesurée.

Avantages : Convient pour évaluer l'usure adhésive et l'usure par fatigue de surface.

Limitations : exigences de dureté élevées pour le matériau du disque et nécessité de corriger l'effet de chaleur de frottement.

Test d'usure à trois corps

Principe : Introduire un troisième abrasif pour simuler l'usure dans des conditions de travail complexes et mesurer la largeur et la profondeur des cicatrices d'usure.

Avantages : Plus proche des scénarios d'application réels, tels que l'usure des forets miniers.

Le test d'usure par écoulement de sable (ASTM G65) est devenu la méthode courante pour tester la résistance à l'usure du carbure cimenté en raison de sa forte simulation et de son degré élevé de normalisation.

7.0.4.3. Facteurs affectant la résistance à l'usure du carbure cimenté

La résistance à l'usure est influencée par de nombreux facteurs, notamment la microstructure, le rapport de composition, les conditions de travail et les facteurs environnementaux. L'analyse spécifique est la suivante :

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

dureté

效应：硬度越高，耐磨性越好，遵循 Archard 磨损公式 ($V = k \cdot F \cdot L / H$, H 为硬度)。

Mécanisme：La dureté élevée réduit la profondeur de coupe abrasive et la largeur de la rainure de surface.

Limite：Une dureté trop élevée peut réduire la ténacité et augmenter le risque d'usure fragile.

Taille des grains

Effet：Le raffinement du grain améliore généralement la résistance à l'usure, mais un raffinement excessif du grain peut avoir des effets négatifs.

Mécanisme：Une granulométrie modérée augmente la densité des joints de grains et empêche l'invasion des particules abrasives ; des grains excessivement fins peuvent provoquer des défauts aux joints de grains et conduire à des microfissures.

Contenu Co

Effet：La résistance à l'usure est meilleure lorsque la teneur en Co est modérée.

Mécanisme：Une quantité appropriée de Co fournit un support plastique et réduit l'usure adhésive ; lorsqu'elle est trop élevée, le Co se ramollit et augmente la perte de matière ; lorsqu'elle est trop faible, il manque de ténacité et est sujet à l'usure fragile.

Température de fonctionnement

Effet：Les températures élevées réduisent la résistance à l'usure, en particulier lorsque l'usure adhésive domine.

Mécanisme：La température élevée ramollit la phase Co, augmentant l'usure de l'adhésif et le transfert de matière.

Rugosité de surface

Effet：La douceur de la surface améliore la résistance à l'usure.

Mécanisme：La faible rugosité réduit les points d'usure initiaux et réduit l'incrustation abrasive.

Corrosion environnementale

Effet：L'environnement corrosif accélère l'usure.

Mécanisme：L'environnement acide dissout la phase Co, formant des piqûres de corrosion et augmentant l'usure.

7.0.4.4. Micromécanisme de résistance à l'usure du carbure cémenté

Le mécanisme microscopique de la résistance à l'usure implique les aspects suivants :

Dureté élevée de la phase WC

La dureté de la phase WC (HV 2000-2500) résiste à la coupe abrasive, réduit la perte de matière de surface et constitue la principale source de résistance à l'usure.

Renforcement des joints de grains

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

Les joints de grains empêchent l'invasion des particules abrasives grâce au mécanisme de renforcement d'Orowan, et une granulométrie modérée (0,5-1 μm) a le meilleur effet.

Effet lubrifiant de la phase Co

Lorsque la quantité de phase Co est appropriée, elle assure la lubrification et l'amortissement plastique, réduisant l'usure adhésive ; lorsqu'elle est trop élevée, elle augmente le transfert de matière.

La couche d'oxyde de surface

forme une couche d'oxyde WO_3 à haute température pour réduire l'usure, mais une épaisseur de couche inégale peut provoquer un pelage.

Type d'usure

Usure abrasive : des particules dures coupent la surface, formant des rainures.

Usure adhésive : le ramollissement du Co à haute température entraîne un transfert de matière.

Usure par fatigue : la propagation des microfissures sous charge cyclique intensifie l'usure.

7.0.4.5. Importance de la résistance à l'usure du carbure cimenté pour l'application

L'excellente résistance à l'usure du carbure cimenté lui confère une excellente performance dans les conditions de frottement élevé. Ses applications spécifiques incluent :

Outils d'aviation

Exigences : Vitesse de coupe > 800 m/min, nécessité de résister à un frottement élevé et à l'usure abrasive.

Mécanisme : La dureté élevée réduit l'usure du tranchant.

Trépans de forage minier

Exigences : Forage de roche dure (dureté de la roche > 800 HV), nécessité de résister à l'usure abrasive.

Mécanisme : Le raffinement du grain réduit la largeur des rainures et prolonge la durée de vie.

Moule résistant à l'usure

Exigences : Extrusion à haute fréquence (> 10^6 fois), nécessité de résister à l'usure de surface.

Mécanisme : La faible rugosité de surface réduit le point d'usure initial.

Conditions de température élevée

Demande : Découpe à haute température (> 800 °C), comme le traitement des aubes de turbines d'aviation.

Mécanisme : Le revêtement de surface réduit l'usure de l'adhésif à haute température.

7.0.4.6. Optimisation et développement futur de la résistance à l'usure du carbure cimenté

Pour améliorer encore la résistance à l'usure, les stratégies suivantes peuvent être adoptées :

Optimisation de la microstructure :

La granulométrie de 0,5 à 1 μm est sélectionnée et obtenue grâce à un broyage à billes à haute énergie pour optimiser la résistance à l'usure.

La teneur en Co est contrôlée entre 8 et 12 % pour équilibrer la plasticité et la dureté.

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

Contrôle additif :

L'ajout d'une petite quantité de VC ou de Cr_3C_2 peut améliorer la résistance des joints de grains et réduire l'usure.

Eviter l'ajout excessif pour éviter la formation de phase cassante.

Renforcement de surface :

Appliquez un revêtement CrN pour augmenter la dureté de la surface et réduire le taux d'usure.

Le revêtement laser forme une couche de haute dureté pour améliorer encore la résistance à l'usure.

Optimisation des processus :

Température de frittage 1400-1500°C, degré de vide $<10^{-2}$ Pa, assure une densité élevée.

Surface polie à faible rugosité pour réduire l'usure initiale.

IA et IIoT :

Exploitez l'IA pour prédire le comportement d'usure et optimiser la conception de la microstructure.

Associée à l'IIoT, la surveillance en temps réel du coefficient de frottement et de l'état de surface peut améliorer la cohérence de la résistance à l'usure.

La résistance à l'usure est la principale performance du carbure cimenté dans des conditions de frottement élevé. Grâce à l'optimisation de la microstructure, du traitement de surface et des technologies émergentes, il peut répondre aux exigences élevées des secteurs de l'aéronautique, de l'exploitation minière et de l'usinage à haute température. Grâce à l'application approfondie de l'IA et de l'Internet industriel des objets (IIoT), la résistance à l'usure et l'efficacité de production du carbure cimenté devraient être considérablement améliorées au cours des deux à trois prochaines années.

7.0.5. Résistance à la fatigue du carbure cimenté

La résistance à la fatigue du carbure cimenté (WC-Co) se caractérise par sa capacité à résister à la rupture par fatigue et à la propagation des fissures sous des charges cycliques. C'est un indicateur important des propriétés mécaniques pour mesurer la durabilité des matériaux en utilisation prolongée. Voici une explication détaillée de la définition, de la méthode de mesure, des facteurs d'influence, du micromécanisme, de l'importance de l'application, de l'optimisation et des développements futurs.

7.0.5.1. Définition de la résistance à la fatigue du carbure cimenté

La résistance à la fatigue désigne la capacité du carbure cimenté à résister à l'amorçage et à la croissance de fissures de fatigue sous des charges et décharges répétées. Cette résistance est généralement caractérisée par sa durée de vie en fatigue (nombre de cycles) ou sa vitesse de croissance (da/dN). La résistance à la fatigue du carbure cimenté est principalement due à la dureté de sa phase dure, le carbure de tungstène (WC), et à la ténacité apportée par sa phase de liaison, le cobalt (Co), qui convient aux sollicitations cycliques à haute fréquence, telles que l'utilisation prolongée d'outils coupants et de forets.

7.0.5.2. Méthode de mesure de la résistance à la fatigue du carbure cimenté

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

La résistance à la fatigue est généralement déterminée par des essais de fatigue normalisés. Voici quelques méthodes courantes et des informations pertinentes :

Essai de fatigue par flexion rotative (ASTM E466)

Principe : L'éprouvette est soumise à des charges de flexion alternées en rotation, et le nombre de cycles avant rupture par fatigue est enregistré. La durée de vie en fatigue est exprimée en cycles (N).

Conditions de test :

Fréquence de chargement : 10-50 Hz.

Rapport de contrainte ($R = \sigma_{\min} / \sigma_{\max}$) : 0,1-0,3.

Environnement : Température ambiante (20-25°C), humidité <50%.

Avantages : Il simule des conditions de contrainte alternées réelles et convient à l'évaluation des performances de fatigue à cycles élevés.

Limitations : La qualité de surface de l'échantillon doit être contrôlée et les résultats des tests sont affectés par la concentration des contraintes.

Essai de fatigue sous charge axiale (ASTM E606)

Principe : L'échantillon est soumis à une charge axiale alternée et la durée de vie en fatigue ou le taux de croissance des fissures est mesuré.

Avantages : Convient pour évaluer la fatigue à faible cycle et le comportement de croissance des fissures.

Limitations : L'équipement de test a des exigences élevées et la répartition des contraintes doit être corrigée.

Essai de croissance des fissures (ASTM E647)

Principe : Une charge est appliquée sur un échantillon pré-fissuré et la relation entre la vitesse de croissance de la fissure (da/dN) et le facteur d'intensité de contrainte (ΔK) est mesurée.

Avantages : Fournit des données quantitatives sur les mécanismes de croissance des fissures.

Technologie complémentaire : Combiné à la microscopie optique (résolution $<1 \mu m$) ou à la microscopie électronique à balayage (MEB) pour observer la morphologie des fissures.

L'essai de fatigue par flexion rotative est devenu la méthode courante pour tester la résistance à la fatigue du carbure cimenté en raison de sa forte simulation et de son degré élevé de standardisation.

7.0.5.3. Facteurs affectant la résistance à la fatigue du carbure cimenté

La résistance à la fatigue est influencée par de multiples facteurs tels que la microstructure, le rapport entre les composants, les conditions de charge et les facteurs environnementaux. L'analyse spécifique est la suivante :

Taille des grains

Effet : Le raffinement du grain améliore généralement la résistance à la fatigue.

Mécanisme : Les grains fins augmentent la densité des joints de grains et entravent la propagation

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

des fissures ; des grains excessivement grossiers peuvent former des points de concentration de contraintes.

Contenu Co

Effet : Les performances anti-fatigue sont meilleures lorsque la teneur en Co est modérée.

Mécanisme : Une quantité appropriée de Co fournit un tampon plastique et réduit la concentration de contrainte ; lorsqu'elle est trop élevée, le Co se ramollit et réduit la résistance à la fatigue ; lorsqu'elle est trop faible, il manque de ténacité et est sujet aux fissures.

Rapport de stress

Effet : Le rapport de contrainte affecte la durée de vie en fatigue.

Mécanisme : Un faible rapport de contrainte ($R < 0,1$) augmente la durée de vie en fatigue ; un rapport de contrainte élevé ($R > 0,5$) accélère la croissance des fissures.

Humidité ambiante

Effet : Une humidité élevée réduit la résistance à la fatigue.

Mécanisme : Lorsque l'humidité augmente, la phase Co peut subir une légère corrosion, formant des microfissures et accélérant la rupture par fatigue.

Défauts de surface

Effet : La qualité de la surface affecte la résistance à la fatigue.

Mécanisme : Les fissures de surface ou rugosités ($R_a > 0,2 \mu m$) deviennent la source de fissures de fatigue, réduisant la durée de vie.

7.0.5.4. Mécanisme microscopique de résistance à la fatigue du carbure cémenté

Le mécanisme microscopique de la résistance à la fatigue implique les aspects suivants :

Dureté élevée de la phase WC

La dureté de la phase WC (HV 2000-2500) fournit une base pour la résistance à la fatigue et résiste à la déformation plastique causée par les contraintes cycliques.

Renforcement des joints de grains

Les joints de grains empêchent la propagation des fissures grâce au mécanisme de renforcement d'Orowan, et une taille de grain modérée ($0,5-1 \mu m$) a le meilleur effet.

Régulation de la plasticité de la phase Co

Lorsque la quantité de phase Co est appropriée, elle absorbe l'énergie par déformation plastique et retarde la propagation des fissures ; lorsqu'elle est trop élevée, elle augmente les dommages par fatigue.

Déflexion des fissures

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

Les joints de grains WC provoquent une déflexion du chemin des fissures, augmentant ainsi la résistance à la croissance des fissures.

Type de dommage dû à la fatigue

Amorçage de surface : Les contraintes cycliques conduisent à des microfissures de surface (longueur < 0,1 mm).

Extension interne : La fissure s'étend le long de la limite des grains ou du bassin de Co.

Fracture : La fracture finale se produit une fois la durée de vie en fatigue épuisée.

7.0.5.5. Importance de la résistance à la fatigue du carbure cimenté pour l'application

Grâce à son excellente résistance à la fatigue, le carbure cimenté est performant sous des charges cycliques. Applications spécifiques :

Outils d'aviation

Exigences : Découpe haute fréquence (>500 Hz), résistance à la fatigue cyclique.

Mécanisme : La dureté élevée réduit l'initiation des fissures de surface et prolonge la durée de vie.

Trépan de forage minier

Exigences : Impact cyclique (fréquence > 500 Hz), résistance à la rupture par fatigue requise.

Mécanisme : Le renforcement des joints de grains retarde la propagation des fissures et améliore la durabilité.

Moule résistant à l'usure

Exigences : Extrusion haute fréquence (>10⁶ fois), résistance à la fatigue.

Mécanisme : Les faibles défauts de surface réduisent les sources de fissures de fatigue.

Composants mécaniques

Exigences : Charge cyclique à long terme, résistance à la fatigue requise.

Mécanisme : Une quantité appropriée de Co améliore la ténacité et retarde les dommages dus à la fatigue.

7.0.5.6. Optimisation et développement futur de la résistance à la fatigue du carbure cimenté

Pour améliorer encore la résistance à la fatigue, les stratégies suivantes peuvent être adoptées :

Optimisation de la microstructure :

La granulométrie de 0,5 à 1 µm est sélectionnée et obtenue grâce à un broyage à billes à haute énergie pour améliorer le renforcement des limites des grains.

La teneur en Co est contrôlée entre 8 et 12 % pour équilibrer la ténacité et la dureté.

Contrôle additif :

L'ajout d'une petite quantité de VC ou de TaC peut améliorer la résistance des joints de grains et réduire la propagation des fissures.

Eviter l'ajout excessif pour éviter la formation de phase cassante.

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

Renforcement de surface :

Appliquer un revêtement TiN ou CrN pour améliorer la résistance à la fatigue de la surface.
Polissage à faible rugosité ($R_a < 0,1 \mu m$) pour réduire les sources de fissures de fatigue.

Optimisation des processus :

Température de frittage 1400-1500°C, degré de vide $< 10^{-2}$ Pa, assure une densité élevée.
Contrôlez la vitesse de refroidissement (3-5°C/min) pour réduire le stress thermique.

IA et IIoT :

Utilisez l'IA pour prédire la durée de vie en fatigue et optimiser la conception de la microstructure.
Associée à l'IIoT, la surveillance en temps réel de la répartition des contraintes et de la propagation des fissures peut améliorer la cohérence de la résistance à la fatigue.

La résistance à la fatigue est la principale performance du carbure cimenté sous des conditions de chargement cycliques. Grâce à l'optimisation de la microstructure, du traitement de surface et des technologies émergentes, il peut répondre aux exigences élevées des secteurs de l'aéronautique, de l'exploitation minière et de la fabrication de machines. Grâce à l'application approfondie de l'IA et de l'Internet industriel des objets (IIoT), la résistance à la fatigue et l'efficacité de production du carbure cimenté devraient être considérablement améliorées au cours des deux à trois prochaines années.

7.0.6. Résistance aux chocs du carbure cimenté

La résistance aux chocs du carbure cimenté (WC-Co) se caractérise par sa capacité à résister à la fracture et à la déformation sous des charges d'impact élevées. C'est un indicateur de performance mécanique important pour mesurer la fiabilité des matériaux sous des charges dynamiques. Voici une explication détaillée de la définition, de la méthode de mesure, des facteurs d'influence, du mécanisme microscopique, de l'importance de l'application, de l'optimisation et des développements futurs.

7.0.6.1. Définition de la résistance aux chocs du carbure cimenté

La résistance aux chocs désigne la capacité du carbure cimenté à résister à l'amorçage de fissures et à la rupture lors d'un impact instantané à haute énergie. Cette résistance est généralement caractérisée par l'énergie d'impact (unité J) ou la ténacité. La résistance aux chocs du carbure cimenté est principalement due à la ténacité apportée par la phase de liaison cobalt (Co) et au support de dureté du carbure de tungstène (WC), une phase dure, adaptée aux applications à fort impact, telles que les foreuses minières et les outils de coupe à grande vitesse.

7.0.6.2. Méthode de mesure de la résistance aux chocs du carbure cimenté

La résistance aux chocs est généralement mesurée par des essais d'impact normalisés. Voici les

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

méthodes courantes et les détails pertinents :

Essai d'impact Charpy (ASTM E23)

Principe : L'échantillon est impacté par un pendule dans un état de flexion à trois points, et l'énergie nécessaire à la rupture (travail d'impact) est mesurée.

Conditions de test :

Dimensions de l'échantillon : $55 \times 10 \times 10$ mm, avec encoché en V (profondeur 2 mm).

Vitesse d'impact : 5-5,5 m/s.

Environnement : Température ambiante (20-25°C).

Avantages : Il simule les conditions d'impact réelles et les résultats des tests sont fortement corrélés avec les scénarios d'application.

Limitations : La forme de l'encoche et la taille de l'échantillon doivent être strictement contrôlées et les résultats sont affectés par la sensibilité de l'encoche.

Essai d'impact Izod (ASTM E23)

Principe : L'échantillon est fixé sous forme de poutre en porte-à-faux, soumis à l'impact d'un pendule, et l'énergie de rupture est mesurée.

Avantages : Convient aux petits échantillons, facile à utiliser.

Limitations : Les résultats des tests sont affectés par la manière dont l'échantillon est fixé.

Essai d'impact de chute de poids

Principe : Un marteau lourd tombe librement d'une hauteur spécifiée pour impacter l'échantillon et mesurer la résistance aux chocs du matériau.

Avantages : Simule un impact à haute énergie et convient à l'évaluation des performances dynamiques.

Technologie supplémentaire : Combinez la photographie à grande vitesse (fréquence d'images > 1000 ips) pour observer le processus de fracture, ou utilisez la microscopie électronique à balayage (MEB) pour analyser la morphologie de la fracture.

L'essai d'impact Charpy est devenu la méthode courante pour tester la résistance aux chocs du carbure cémenté en raison de son degré élevé de standardisation et de sa forte simulation.

7.0.6.3. Facteurs affectant la résistance aux chocs du carbure cémenté

La résistance aux chocs dépend de multiples facteurs tels que la microstructure, le ratio des composants, les conditions d'essai et les facteurs environnementaux. L'analyse spécifique est la suivante :

Contenu Co

Effet : Plus la teneur en Co est élevée, meilleure est la résistance aux chocs.

Mécanisme : La phase Co absorbe l'énergie d'impact par déformation plastique et réduit la rupture fragile ; lorsque la teneur en Co est trop faible, la fragilité du matériau augmente.

Taille des grains

Effet : Une granulométrie modérée est bénéfique pour la résistance aux chocs.

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

Mécanisme : Lorsque la taille des grains est modérée ($0,5-1 \mu m$), le renforcement des joints de grains et la ténacité sont équilibrés ; des grains trop fins peuvent provoquer des défauts aux joints de grains et des grains trop grossiers réduisent la résistance à la propagation des fissures.

additif

Effet : Les additifs peuvent améliorer la résistance aux chocs.

Mécanisme : L'ajout de TaC ou de Cr_3C_2 améliore la résistance des joints de grains et réduit la fracture intergranulaire.

Température d'essai

Effet : La basse température réduit la résistance aux chocs.

Mécanisme : La basse température réduit la ténacité de la phase Co et augmente la tendance à la rupture fragile.

Défauts de surface

Effet : Les défauts de surface réduisent la résistance aux chocs.

Mécanisme : Les fissures ou rugosités de surface ($R_a > 0,2 \mu m$) deviennent des points de concentration de contraintes, réduisant l'énergie d'impact.

7.0.6.4. Mécanisme microscopique de résistance aux chocs du carbure cémenté

Le mécanisme microscopique de résistance aux chocs implique les aspects suivants :

Absorption plastique de la phase Co.

La phase Co absorbe l'énergie d'impact par déformation plastique, retardant ainsi la propagation des fissures. Une quantité appropriée de Co améliore la ténacité aux chocs.

Déflexion des fissures aux joints de grains WC

Les joints de grains WC provoquent une déflexion du chemin de fissure, augmentent la longueur du chemin de fracture et réduisent la vitesse de fracture.

Renforcement des joints de grains

Les joints de grains empêchent la propagation des fissures grâce au mécanisme de renforcement d'Orowan, et une taille de grain modérée ($0,5-1 \mu m$) a le meilleur effet.

Liaison interfaciale

La force de liaison interfaciale entre WC et Co est obtenue par mouillage du Co, et les défauts interfaciaux peuvent déclencher l'initiation de fissures.

Type de fracture par impact

Fracture intergranulaire : La fissure s'étend le long de la limite des grains de WC, ce qui est plus fréquent lorsque la teneur en Co est faible.

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

transgranulaire : La fissure traverse les particules de WC et est plus fréquente dans les énergies d'impact élevées.

Fracture mixte : coexistent des fractures intergranulaires et transgranulaires , ce qui est fréquent dans les conditions de travail réelles.

7.0.6.5. Importance de la résistance aux chocs du carbure cimenté pour l'application

L'excellente résistance aux chocs du carbure cimenté lui confère une excellente performance dans les environnements à fort impact. Applications spécifiques :

Trépons de forage minier

Exigences : Impact haute fréquence (>500 Hz), résistance à la fracture par impact.

Mécanisme : La teneur élevée en Co absorbe l'énergie d'impact et réduit le risque de fracture.

Outils d'aviation

Exigences : Coupe à grande vitesse (>800 m/min), résistance aux chocs dynamiques.

Mécanisme : Le renforcement des joints de grains retarde la croissance des fissures et prolonge la durée de vie.

matrice d'impact

Exigences : Estampage haute fréquence ($> 10^6$ fois), résistance à la rupture par impact.

Mécanisme : Les faibles défauts de surface réduisent l'initiation des fissures.

Équipements de haute mer

Exigences : Choc de pression en haute mer (> 80 MPa), nécessité de résister à une charge dynamique.

Mécanisme : Une quantité appropriée de Co et un revêtement de surface améliorent la résistance aux chocs.

7.0.6.6. Optimisation et développement futur de la résistance aux chocs des carbures cimentés

Pour améliorer encore la résistance aux chocs, les stratégies suivantes peuvent être adoptées :

Optimisation de la microstructure :

La granulométrie de $0,5$ à $1\ \mu\text{m}$ est sélectionnée et obtenue grâce à un broyage à billes à haute énergie pour optimiser l'équilibre entre le renforcement des limites des grains et la ténacité.

La teneur en Co est contrôlée entre 8 et 12% pour améliorer l'absorption de l'énergie d'impact.

Contrôle additif :

L'ajout d'une petite quantité de TaC ou de Cr_3C_2 peut améliorer la résistance des joints de grains et réduire la fracture intergranulaire.

Eviter l'ajout excessif pour éviter la formation de phase cassante.

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

Renforcement de surface :

Appliquer un revêtement TiN ou CrN pour améliorer la résistance aux chocs de la surface.
Polissage à faible rugosité ($R_a < 0,1 \mu m$) pour réduire les points de concentration de contraintes.

Optimisation des processus :

Température de frittage 1400-1500°C, degré de vide $< 10^{-2}$ Pa, assure une densité élevée.
Contrôlez la vitesse de refroidissement (3-5°C/min) pour réduire le stress thermique.

IA et IIoT :

Utilisez l'IA pour prédire le comportement des fractures par impact et optimiser la conception de la microstructure.

Associée à l'IIoT, la surveillance en temps réel de l'initiation et de la propagation des fissures peut être utilisée pour améliorer la cohérence de la résistance aux chocs.

La résistance aux chocs est la principale performance du carbure cimenté sous charge dynamique. Grâce à l'optimisation de la microstructure, du traitement de surface et des technologies émergentes, il répond aux exigences élevées des équipements miniers, aéronautiques et sous-marins. Grâce à l'application approfondie de l'IA et de l'Internet industriel des objets (IIoT), la résistance aux chocs et l'efficacité de production du carbure cimenté devraient être considérablement améliorées au cours des deux à trois prochaines années.

7.0.7. Analyse complète et application des propriétés mécaniques du carbure cimenté

Les propriétés mécaniques du carbure cimenté (WC-Co) présentent des interactions et des compromis complexes, qui doivent être pris en compte de manière exhaustive pour répondre aux besoins des différents scénarios d'application. Voici une analyse détaillée des compromis de performance, des stratégies d'optimisation et des perspectives de développement.

7.0.7.1. Compromis entre les propriétés mécaniques du carbure cimenté

Il existe un certain compromis entre les propriétés mécaniques du carbure cimenté, qui se reflète dans les aspects suivants :

Dureté et ténacité

Relation : Une dureté élevée s'accompagne généralement d'une faible ténacité et vice versa.

Mécanisme : Une dureté élevée (obtenue par des grains WC fins et une faible teneur en Co) améliore la résistance à la déformation, mais réduit la plasticité et la ténacité à la rupture (K_{IC}), ce qui peut facilement conduire à une rupture fragile ; une ténacité élevée (fournie par une teneur en Co plus élevée) absorbe l'énergie par déformation plastique, mais réduit la dureté et affaiblit la résistance à l'usure.

Impact de l'application : les outils aéronautiques nécessitent une dureté élevée pour résister à l'usure, tandis que les forets miniers requièrent une grande ténacité pour résister aux chocs. Ces deux éléments doivent être équilibrés en fonction des conditions de travail spécifiques.

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

Résistance à la fatigue et aux chocs

Relation : La résistance à la fatigue et la résistance aux chocs ont des exigences différentes sur la microstructure.

Mécanisme : La résistance à la fatigue dépend de l'optimisation de la microstructure (comme une granulométrie modérée) pour empêcher la propagation des fissures ; la résistance aux chocs nécessite une teneur en Co plus élevée pour améliorer la capacité d'absorption d'énergie et réduire la fracture instantanée.

Impact de l'application : dans les charges cycliques à haute fréquence (comme les outils de coupe de l'aviation), la résistance à la fatigue est plus importante ; dans les scénarios à fort impact (comme les forets miniers), la résistance aux chocs est prioritaire.

Résistance à l'usure et adaptabilité environnementale

Relation : La résistance à l'usure peut être mise à rude épreuve dans des environnements difficiles tels que des températures élevées ou la corrosion.

Mécanisme : La température élevée ($> 800\text{ }^{\circ}\text{C}$) ramollit la phase Co et augmente l'usure adhésive ; l'environnement corrosif ($\text{pH} < 5$) provoque la dissolution de la phase Co, formant des piqûres de corrosion et accélérant l'usure.

Impact de l'application : Le traitement des aubes de turbine d'aviation doit prendre en compte la résistance à l'usure à haute température, et les forets en haute mer doivent prêter attention aux performances dans les environnements corrosifs.

7.0.7.2. Stratégies d'optimisation des propriétés mécaniques du carbure cimenté

Afin d'optimiser les performances globales du carbure cimenté, les stratégies suivantes peuvent être adoptées :

Régulation de la microstructure

Taille des grains : utilisez des grains WC de $0,2$ à $2\text{ }\mu\text{m}$. Les grains fins ($< 0,5\text{ }\mu\text{m}$) améliorent la dureté et la résistance à l'usure, tandis que les grains plus gros (1 à $2\text{ }\mu\text{m}$) améliorent la ténacité et la résistance aux chocs.

Teneur en Co : contrôlée entre 6% et 15% . Une faible teneur en Co (6% à 8%) est adaptée aux exigences de dureté élevée, tandis qu'une teneur élevée en Co (12% à 15%) est adaptée aux exigences de ténacité et de résistance aux chocs élevées.

Optimisation additive

L'ajout d'une petite quantité de VC ou de TaC améliore la résistance des joints de grains, améliore la résistance à l'usure et à la fatigue tout en maintenant la ténacité.

Eviter l'ajout excessif pour éviter la formation de phase cassante.

Technologie de modification de surface

Appliquez un revêtement CrN ou TiN pour augmenter la dureté de la surface et la résistance à l'usure

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

et améliorer les performances dans les environnements à haute température et corrosifs.

La technologie de revêtement laser ou d'implantation ionique est utilisée pour former une couche de surface à haute dureté afin d'améliorer la résistance aux chocs et à la fatigue.

7.0.7.3. Scénarios d'application des propriétés mécaniques du carbure cimenté

Grâce à une optimisation complète, le carbure cimenté peut répondre aux besoins des applications exigeantes suivantes :

Outils d'aviation

Exigences : Dureté et résistance à l'usure élevées pour résister à l'usure par coupe, résistance élevée à la fatigue pour résister aux charges cycliques.

Stratégie d'optimisation : granulométrie 0,2-0,5 μm , teneur en Co 6%-8%, revêtement de surface CrN .

Trépan de forage minier

Exigences : Haute ténacité et résistance aux chocs pour résister aux impacts, haute résistance à l'usure pour résister à l'usure des roches dures.

Stratégie d'optimisation : granulométrie 1-2 μm , teneur en Co 12-15 % , ajout de TaC pour renforcer les joints de grains.

Moule résistant à l'usure

Exigences : Dureté et résistance à l'usure élevées pour résister à l'usure par extrusion, résistance élevée à la fatigue pour prolonger la durée de vie.

Stratégie d'optimisation : granulométrie 0,5-1 μm , teneur en Co 8%-12%, surface polie à faible rugosité.

7.0.7.4. Évolution future des propriétés mécaniques du carbure cimenté

À l'avenir, les performances globales et la fiabilité des applications du carbure cimenté pourront être encore améliorées grâce aux technologies suivantes :

Technologie d'IA : utiliser l'IA pour prédire les compromis de performances et optimiser la conception de la microstructure (comme la taille des grains et la teneur en Co).

Internet industriel des objets (IIoT) : surveillance en temps réel de la répartition des contraintes et de la propagation des fissures pendant l'utilisation pour améliorer la cohérence des performances.

Technologie de fabrication avancée : combinaison de l'impression 3D et de la nanotechnologie pour développer du carbure cimenté à structure graduée (comme une dureté élevée en surface et une ténacité élevée à l'intérieur) pour répondre aux besoins multifonctionnels.

Une analyse approfondie montre que les propriétés mécaniques du carbure cimenté doivent être évaluées et optimisées pour répondre aux exigences spécifiques des applications. Grâce à la maîtrise de la microstructure, aux additifs et aux technologies de modification de surface, le carbure cimenté

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

peut être largement utilisé dans l'aéronautique, l'exploitation minière et la fabrication de moules. À l'avenir, l'application approfondie de l'IA et de l'Internet industriel des objets (IIoT) favorisera l'amélioration de ses performances et le développement de ses applications.

7.1 Équilibre entre dureté et ténacité du carbure cimenté

(1) Dureté du carbure cimenté

La dureté du carbure cimenté (WC-Co) désigne sa capacité à résister à la déformation et à l'usure, généralement exprimée en dureté Vickers (HV), comprise entre 1200 et 1800. La dureté est influencée par les facteurs suivants :

La granulométrie du WC

(par exemple 0,2-0,5 μm) est d'autant plus élevée que la dureté peut atteindre HV 1800 (effet Hall-Petch).

Teneur en Co

Lorsque la teneur en Co est faible (par exemple 6 à 8 %), la dureté est plus élevée (HV 1600 à 1800) ; lorsque la teneur en Co est élevée (par exemple 12 à 15 %), la dureté diminue (HV 1200 à 1400).

en tant qu'additif,

il peut inhiber la croissance des grains et augmenter la dureté de 5 à 10 %, jusqu'à HV 2000.

La modification de surface

telle que la cémentation ou le revêtement laser peut augmenter la dureté jusqu'à HV 2000-2500.

Dureté du carbure cimenté

La dureté du carbure cimenté (WC-Co) peut être exprimée de diverses manières, selon la méthode d'essai et le scénario d'application. Les méthodes d'expression courantes sont les suivantes :

Plage de dureté Vickers (HV) du

carbure cimenté : HV 1 200-1 800, jusqu'à HV 2 000-2 500 (après modification de surface).

Description : Appliquer une charge standard (généralement 30 kg) à l'aide d'un duromètre Vickers et calculer la surface d'empreinte. Avantages : Convient à une large gamme de mesures du carbure cimenté, reflétant sa capacité à résister à la déformation.

Plage

de dureté Rockwell (HR) : HRA 80-94 (échelle A).

Description : Appliquer une charge de 150 kg à l'aide d'un cône diamanté et mesurer la profondeur d'indentation. Avantages : Test rapide, adapté aux tests à grande échelle.

Plage

de dureté Brinell (HB) : HB 1 000-1 600 (nécessite une charge importante, par exemple

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

3 000 kg).

Description : Utiliser une bille d'acier ou de carbure pour appuyer et calculer la zone d'indentation.

Limitations : Applicabilité limitée aux matériaux à dureté élevée (comme le carbure), un réglage de la charge est nécessaire.

Microdureté (HV0,1-HV1)

Plage : HV 1200-1800 (faible charge, par exemple 0,1-1 kg).

Description : Utilisé pour la mesure de zones microscopiques, particulièrement adapté à l'analyse des grains ou des revêtements. Avantages : Haute précision, adapté à l'évaluation des propriétés locales.

Ces méthodes de représentation reflètent la capacité du carbure cimenté à résister à la compression, à la déformation et à l'usure. La dureté Vickers (HV) est la plus couramment utilisée en raison de sa large application. La valeur réelle dépend de la granulométrie du WC, de la teneur en Co et des additifs (le VC, par exemple, peut augmenter la HV de 5 à 10 %).

(2) Ténacité du carbure cimenté

La ténacité du carbure cimenté (WC-Co) est généralement caractérisée par sa ténacité à la rupture (K_{Ic}), comprise entre 8 et 16 $\text{MPa}\cdot\text{m}^{1/2}$. Ses caractéristiques de ténacité sont les suivantes :

la teneur en Co est

élevée, meilleure est la ténacité. Lorsque la teneur en Co est de 6 %, K_{Ic} est d'environ 8 à 10 $\text{MPa}\cdot\text{m}^{1/2}$; lorsque la teneur en Co est de 12 à 15 %, K_{Ic} peut atteindre 14 à 16 $\text{MPa}\cdot\text{m}^{1/2}$.

Lorsque la taille des grains

est grossière (par exemple 1-2 μm), la ténacité est plus élevée ($K_{Ic} > 12 \text{ MPa}\cdot\text{m}^{1/2}$) ; lorsque la taille des grains est trop fine (par exemple $< 0,2 \mu\text{m}$), la ténacité peut diminuer en raison du glissement des joints de grains ($K_{Ic} < 8 \text{ MPa}\cdot\text{m}^{1/2}$).

Ajout de TaC (0,2 %-0,5 %) en tant qu'additif

peut renforcer les joints de grains et augmenter K_{Ic} d'environ 5 % à 10 %.

La méthode d'essai

utilise la méthode de la poutre entaillée à un seul bord (SENB). Par exemple, le K_{Ic} du WC-10Co (grain 0,5 μm , Co 10 %) est d'environ 12 $\text{MPa}\cdot\text{m}^{1/2}$, ce qui convient aux forêts minières. La dureté et la ténacité doivent être équilibrées, et une ténacité élevée s'accompagne généralement d'une diminution de la dureté (HV < 1400).

(3) Types de ténacité du carbure cimenté

Le carbure cimenté (WC-Co) est principalement caractérisé par les indicateurs et méthodes suivants, reflétant sa capacité à résister à la fracture et à absorber l'énergie :

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

Ténacité à la rupture (K_{Ic}) La ténacité à la rupture (K_{Ic}) est la capacité du carbure cimenté à résister à la propagation des fissures lorsque des fissures existent, et son unité est $\text{MPa} \cdot \text{m}^{1/2}$. Le K_{Ic} du carbure cimenté est généralement déterminé par l'effet synergique de la phase dure du carbure de tungstène (WC) et de la phase liante du cobalt (Co), reflétant l'équilibre entre la dureté et la ténacité du matériau.

Le K_{Ic} du carbure cimenté (WC-Co) est un indice de propriétés mécaniques clé pour sa résistance à la propagation des fissures et à la rupture, et joue un rôle essentiel dans la fiabilité et la durée de vie du matériau. Voici une description détaillée de divers aspects importants et facteurs d'influence.

Importance de la ténacité à la rupture du carbure cimenté

La ténacité à la rupture (K_{Ic}) est la propriété essentielle du carbure cimenté, qui lui permet de maintenir son intégrité structurelle sous de fortes contraintes, chocs ou défauts. Le carbure cimenté est largement utilisé en découpe, perçage et fabrication de moules en raison de sa dureté élevée (généralement fournie par le WC, environ HV 2000-2500). Cependant, cette dureté élevée s'accompagne souvent d'une forte fragilité, ce qui rend le matériau sujet à des fractures irrégulières sous charge dynamique ou en présence de microfissures. K_{Ic} quantifie la capacité du matériau à résister à une telle fracture fragile et détermine directement si le carbure cimenté peut supporter un impact inattendu ou une défaillance induite par un défaut en utilisation réelle. Par exemple, dans un environnement d'impact à haute fréquence ou de chargement cyclique, une valeur K_{Ic} plus faible peut entraîner une expansion rapide des microfissures jusqu'à des macrofissures, tandis qu'une valeur K_{Ic} plus élevée peut prolonger considérablement la durée de vie en fatigue et la résistance aux chocs. De plus, K_{Ic} affecte également la sécurité lors de l'usinage, car une rupture soudaine des outils en carbure cimenté peut entraîner des interruptions de production ou des dommages aux équipements. Par conséquent, l'optimisation de K_{Ic} est un objectif important pour améliorer les performances globales et la fiabilité du carbure cimenté dans les applications industrielles, notamment dans des conditions extrêmes (températures élevées, pressions élevées ou environnements corrosifs).

Facteurs affectant la ténacité à la fracture du carbure cimenté

La ténacité à la fracture du carbure cimenté est affectée par une variété de microstructures, de rapports de composition et de paramètres de processus de préparation, comme suit :

Contenu Co

Fonction : Co, en tant que phase de liaison, affecte de manière significative K_{Ic} grâce à sa capacité de déformation plastique.

Mécanisme : Lorsque la teneur en Co augmente, la proportion de phase tenace dans le matériau augmente, ce qui améliore la capacité de dissipation plastique et inhibe la propagation des fissures. Lorsque la teneur en Co est faible (par exemple, 6 % ou moins), la phase WC est dominante et, malgré une dureté élevée, la couche tampon plastique est insuffisante, ce qui entraîne un faible K_{Ic} . Lorsque la teneur en Co est élevée (par exemple, 12 % à 15 %), la plasticité est améliorée et le K_{Ic} augmente significativement.

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

Gamme et équilibre : La teneur typique en Co est comprise entre 6 % et 15 %, 10 % à 12 % étant considéré comme l'équilibre optimal entre ténacité et dureté.

Limitations : Une teneur en Co trop élevée peut réduire la dureté et la résistance à l'usure et doit être ajustée en fonction des besoins spécifiques.

Taille des grains

Effet : L'effet de la taille des grains de WC sur K_{IC} est double.

机制: 较细的晶粒 (如 0.2-0.5 μm) 通过 Hall-Petch 效应 ($\sigma_y = \sigma_0 + k \cdot d^{-1/2}$) 增加晶界密度 ($>10^{13} \text{ m}^{-2}$), 提高强度, 但可能因晶界缺陷 (如空隙或微裂纹) 降低 K_{IC} ; 适中晶粒尺寸 (0.5-1 μm) 提供最佳的晶界强化与韧性平衡; 较大晶粒 ($>2 \mu\text{m}$) 减少晶界密度, 增强裂纹偏转能力, K_{IC} 随晶粒粗大而有所提升, 但硬度可能下降。

Influence du procédé : La taille des grains est contrôlée par la température de frittage (1 400-1 500 °C) et la durée (1 à 3 heures). Un frittage à haute température ou de longue durée peut facilement entraîner une croissance des grains.

additif

Effet : Des additifs tels que VC, TaC ou Cr_3C_2 peuvent améliorer considérablement K_{IC} .

Mécanisme : Ces additifs renforcent les joints de grains par dissolution solide ou précipitation, inhibent la croissance des grains de WC (taux de migration des joints de grains $< 10^{-10} \text{ m/s}$) et améliorent la résistance de liaison de l'interface ($> 150 \text{ MPa}$). Par exemple, le VC (0,2 %-0,5 %) forme une fine couche de VC_x pour réduire les points faibles aux joints de grains ; le TaC améliore la ténacité des joints de grains et réduit la tendance à la fracture intergranulaire.

Limitations : Un ajout trop élevé (par exemple $> 0,8 \%$) peut former une phase cassante (par exemple VC_x excessif), ce qui à son tour réduit K_{IC} .

Uniformité de la microstructure

Effet : L'uniformité de la microstructure affecte directement K_{IC} .

Mécanisme : La répartition uniforme des phases WC et Co réduit la concentration de contraintes, et la structure, avec une faible porosité ($< 1 \%$) et peu de défauts aux joints de grains ($< 0,5 \%$), améliore la ténacité. Si le Co est réparti de manière inégale (par exemple, formation de flaques de Co de taille $> 5 \mu\text{m}$), des fissures sont susceptibles de se propager le long des zones fragiles, et K_{IC} diminue.

Influence du processus : Le pressage isostatique à froid (CIP, pression 200-300 MPa) ou le frittage sous vide peuvent améliorer l'homogénéité microstructurale.

Procédé de frittage

Effet : Les paramètres de frittage affectent les performances finales de K_{IC} .

Mécanisme : La température de frittage (1400-1500°C) est trop élevée ou le temps de frittage est trop long, ce qui entraîne des grains grossiers et une ségrégation du Co, réduisant ainsi K_{IC} ; une température et un vide appropriés ($< 10^{-2} \text{ Pa}$) assurent une structure dense et optimisent la ténacité. La vitesse de refroidissement (3-5°C/min) contrôle la contrainte thermique ($< 100 \text{ MPa}$) et évite la

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

formation de microfissures.

Optimisation : Le frittage en plusieurs étapes (comme le préfrittage à basse température + le frittage à haute température) peut améliorer la cohérence microstructurale.

État de surface

Effet : Les défauts de surface ou les contraintes résiduelles affectent K_{Ic} .

Mécanisme : Les fissures de surface, la rugosité ($R_a > 0,2 \mu m$) ou la contrainte résiduelle de traction ($> 200 MPa$) deviennent des sources d'initiation de fissures, réduisant K_{Ic} ; la contrainte résiduelle de compression ($> 400 MPa$) peut augmenter K_{Ic} par modification de surface (comme le grenaillage).

Influence du processus : Polissage à $R_a < 0,1 \mu m$ ou traitement de revêtement (tel que TiN) pour améliorer l'état de surface.

Mécanisme microscopique

Dissipation plastique de la phase Co : la phase Co subit une déformation plastique (taux de déformation $\sim 10^{-3} s^{-1}$) sous l'effet d'un impact ou d'une contrainte, absorbant l'énergie de la fissure et retardant l'expansion de la fissure.

Déviation et pontage des joints de grains : les joints de grains WC provoquent une déviation des fissures (angle $20^\circ-40^\circ$), augmentant la longueur du chemin; la phase Co forme un effet de pontage à la pointe de la fissure, consommant de l'énergie.

Résistance de liaison de l'interface : l'interface WC-Co (résistance de liaison $> 50 MPa$, angle de contact $< 15^\circ$) affecte la résistance à la propagation des fissures et les défauts d'interface (tels que les vides $> 0,5\%$) réduisent K_{Ic} .

Suppression des microfissures : les additifs renforcent les joints de grains, réduisent l'initiation des microfissures (longueur $< 0,05 mm$) et améliorent la ténacité globale.

La ténacité à la fracture est au cœur de l'optimisation des performances du carbure cimenté, qui doit être équilibrée en ajustant la teneur en Co, la taille des grains, les additifs et le processus de préparation pour répondre aux besoins dans différentes conditions de travail.

(4) Résistance aux chocs du carbure cimenté

La ténacité aux chocs du carbure cimenté (WC-Co) se caractérise par sa capacité à résister à la fracture et à la déformation sous des charges d'impact à haute énergie. C'est un indicateur important des propriétés mécaniques pour mesurer la fiabilité des matériaux soumis à des charges dynamiques. Voici une explication détaillée de sa définition, de son importance, de sa méthode de mesure, de ses facteurs d'influence et de son mécanisme microscopique.

Définition de la ténacité aux chocs du carbure cimenté

La ténacité aux chocs désigne la capacité du carbure cimenté à absorber l'énergie et à résister à la rupture sous un impact instantané à haute énergie. Elle est généralement caractérisée par l'énergie d'impact (unité J) ou l'énergie de rupture lors d'un essai de choc. La ténacité aux chocs du carbure cimenté est principalement déterminée par la capacité de déformation plastique du cobalt (Co) en

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

phase de liaison et par la dureté du carbure de tungstène (WC) en phase dure, reflétant la résistance à la rupture du matériau sous un environnement à fort impact.

L'importance de la résistance aux chocs du carbure cimenté

La ténacité aux chocs est essentielle aux performances du carbure cimenté en conditions dynamiques. Le carbure cimenté est largement utilisé dans l'exploitation minière, la découpe et la fabrication de moules en raison de sa dureté élevée (conférée par le WC, environ HV 2000-2500). Cependant, cette dureté élevée s'accompagne souvent d'une certaine fragilité, ce qui le rend sujet à la rupture fragile sous des charges d'impact élevées (telles que des impacts à haute fréquence ou des charges soudaines). La ténacité aux chocs détermine directement la capacité du carbure cimenté à supporter une telle charge instantanée sans défaillance. Par exemple, dans les forêts minières ou les matrices d'emboutissage, une faible ténacité aux chocs peut entraîner une rupture rapide du matériau sous un impact important, entraînant des dommages aux équipements ou une interruption de la production ; tandis qu'une ténacité élevée peut prolonger efficacement la durée de vie et améliorer la sécurité. De plus, la ténacité aux chocs influence également la fiabilité du carbure cimenté dans des environnements extrêmes (tels que des températures basses ou élevées) et constitue un indicateur important pour l'optimisation des performances globales des matériaux.

Méthode de mesure de la ténacité aux chocs du carbure cimenté

La résistance aux chocs est généralement déterminée par des essais normalisés. Voici les méthodes courantes et les détails pertinents :

Essai d'impact Charpy (ASTM E23)

Principe : L'échantillon est impacté par un pendule en flexion trois points et l'énergie nécessaire à la rupture (travail d'impact) est mesurée.

Conditions de test :

Dimensions de l'échantillon : $55 \times 10 \times 10$ mm, avec encoche en V (profondeur 2 mm).

Vitesse d'impact : 5-5,5 m/s.

Environnement : Température ambiante (20-25°C).

Avantages : Il simule les conditions d'impact réelles et les résultats sont très pertinents pour les scénarios d'application.

Limitations : La forme de l'encoche et la taille de l'échantillon doivent être strictement contrôlées et les résultats des tests sont affectés par la sensibilité de l'encoche.

Essai d'impact Izod (ASTM E23)

Principe : L'échantillon est fixé sous forme de poutre en porte-à-faux, soumis à l'impact d'un pendule, et l'énergie de rupture est mesurée.

Avantages : Convient aux petits échantillons, facile à utiliser.

Limitations : Les résultats sont affectés par la méthode de serrage.

Essai d'impact de chute de poids

Principe : Un marteau lourd tombe librement d'une hauteur spécifiée pour impacter l'échantillon et

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

mesurer la résistance aux chocs.

Avantages : Simule un impact à haute énergie et convient à l'évaluation des performances dynamiques.

Technologie supplémentaire : Combinez la photographie à grande vitesse (fréquence d'images > 1000 ips) pour observer le processus de fracture, ou utilisez la microscopie électronique à balayage (MEB) pour analyser la morphologie de la fracture.

L'essai d'impact Charpy est devenu la méthode courante pour tester la ténacité aux chocs du carbure cémenté en raison de son degré élevé de standardisation et de sa forte simulation.

Facteurs affectant la ténacité aux chocs du carbure cémenté

La ténacité aux chocs du carbure cémenté est affectée par la microstructure, le rapport de composition, les conditions d'essai et les facteurs environnementaux, comme suit :

Contenu Co

Fonction : La teneur en Co est le principal facteur affectant la ténacité aux chocs. Plus la teneur en Co est élevée, meilleure est la ténacité aux chocs.

Mécanisme : La phase Co absorbe l'énergie d'impact par déformation plastique (taux de déformation $\sim 10^{-3} \text{ s}^{-1}$) et réduit la tendance à la rupture fragile. Lorsque la teneur en Co est faible (par exemple 6 % ou moins), le matériau est principalement en phase WC, avec une dureté élevée mais une plasticité insuffisante et une faible ténacité aux chocs ; lorsque la teneur en Co est élevée (par exemple 12 % à 15 %), la plasticité est améliorée et la ténacité aux chocs est considérablement améliorée.

Plage et équilibre : La teneur en Co est comprise entre 6 % et 15 %, et 10 % à 12 % est généralement l'équilibre optimal entre ténacité et dureté.

Limitations : Une teneur en Co trop élevée peut réduire la dureté et la résistance à l'usure et doit être ajustée en fonction des exigences de l'application.

Taille des grains

Effet : L'effet de la granulométrie du WC sur la résistance aux chocs est double.

Mécanisme : Une granulométrie modérée ($0,5-1 \mu\text{m}$) offre le meilleur équilibre entre le renforcement des joints de grains et la ténacité. La densité des joints de grains ($> 10^{13} \text{ m}^{-2}$) empêche la propagation des fissures par le mécanisme de renforcement Orowan. Bien que des grains plus fins ($< 0,2 \mu\text{m}$) améliorent la dureté, les défauts aux joints de grains peuvent augmenter, réduisant ainsi la ténacité aux chocs. Des grains plus gros ($> 2 \mu\text{m}$) augmentent les chemins de déflexion des fissures, la ténacité aux chocs est améliorée, mais la dureté diminue.

Influence du procédé : La taille des grains est contrôlée par la température de frittage ($1400-1500^\circ\text{C}$) et la durée (1 à 3 heures). Une température trop élevée entraîne la formation de grains grossiers.

additif

Fonction : Des additifs tels que TaC ou Cr_3C_2 peuvent améliorer la résistance aux chocs.

Mécanisme : Le TaC améliore la résistance des joints de grains ($> 150 \text{ MPa}$) et réduit la fracture

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

intergranulaire ; Cr_3C_2 inhibe la croissance des grains (taux de migration des joints de grains $< 10^{-10}$ m/s) et améliore la stabilité microstructurale.

Limitations : Un ajout trop élevé (par exemple $> 0,8\%$) peut former une phase cassante et réduire la résistance aux chocs.

Température d'essai

Effet : La température a un effet significatif sur la résistance aux chocs.

Mécanisme : Une basse température ($< -40^\circ\text{C}$) réduit la ténacité de la phase Co et augmente la tendance à la rupture fragile ; une température élevée ($> 800^\circ\text{C}$) peut provoquer un ramollissement de la phase Co et réduire la capacité d'absorption d'énergie.

Impact environnemental : La formule de matériau appropriée doit être sélectionnée en fonction des conditions de travail réelles (telles que la découpe à basse température ou à haute température en haute mer).

Uniformité de la microstructure

Fonction : L'uniformité de la microstructure est essentielle à la résistance aux chocs.

Mécanisme : Des phases WC et Co uniformément réparties réduisent la concentration de contraintes, et les structures à faible porosité ($< 1\%$) et peu de défauts aux joints de grains ($< 0,5\%$) améliorent la ténacité. Si le Co est inégalement réparti (par exemple, en formant un bain de Co de taille $> 5\ \mu\text{m}$), des fissures sont susceptibles de se propager le long des zones fragiles, réduisant ainsi la ténacité.

Influence du processus : Le pressage isostatique à froid (CIP, pression 200-300 MPa) ou le frittage sous vide peuvent améliorer l'uniformité.

État de surface

Effet : Les défauts de surface ou les contraintes résiduelles affectent la ténacité aux chocs.

Mécanisme : Les fissures de surface, la rugosité ($R_a > 0,2\ \mu\text{m}$) ou la contrainte de traction résiduelle ($> 200\ \text{MPa}$) deviennent des points de concentration de contrainte, réduisant la ténacité aux chocs ; la contrainte de compression résiduelle ($> 400\ \text{MPa}$) peut améliorer la résistance aux chocs grâce à une modification de surface (comme le grenaillage).

Influence du processus : Polissage à $R_a < 0,1\ \mu\text{m}$ ou traitement de revêtement (tel que TiN) pour améliorer l'état de surface.

(5) Mécanisme microscopique de la ténacité aux chocs du carbure cimenté

Absorption plastique de la phase Co

La phase Co absorbe l'énergie d'impact par déformation plastique et retarde la propagation des fissures. Une quantité appropriée de Co améliore la ténacité aux chocs.

Déflexion des fissures aux joints de grains WC

Les joints de grains WC provoquent une déviation du chemin de fissure (angle 20° - 40°), augmentent la longueur du chemin de fracture et réduisent la vitesse de fracture.

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

Renforcement des joints de grains

晶界强化：晶界通过 Orowan 强化机制 ($\tau \sim Gb/\lambda$, $\lambda < 1 \mu\text{m}$) 阻碍裂纹扩展, 适中晶粒尺寸 (0.5-1 μm) 效果最佳。

Liaison d'interface

La force de liaison interfaciale ($> 50 \text{ MPa}$) entre WC et Co est obtenue par mouillage du Co (angle de contact $< 15^\circ$), et les défauts interfaciaux (par exemple, vides $> 0,5 \%$) peuvent induire l'initiation de fissures.

Type de fracture par impact

Fracture intergranulaire : La fissure s'étend le long de la limite des grains de WC, ce qui est plus fréquent lorsque la teneur en Co est faible.

Transgranulaire fracture : La fissure traverse les particules de WC et est plus fréquente dans les énergies d'impact élevées.

Fracture mixte : coexistent fractures intergranulaires et transgranulaires , ce qui est fréquent dans les conditions réelles de travail.

La ténacité aux chocs est la performance clé du carbure cimenté sous charge dynamique. Elle peut être optimisée en ajustant la microstructure et les paramètres du procédé pour répondre aux exigences des différentes conditions de travail.

(6) Relation entre la dureté et la ténacité du carbure cimenté

Il existe un compromis entre la dureté et la ténacité (généralement exprimées par la dureté Vickers HV et la ténacité à la rupture K_{IC}) du carbure cimenté (WC-Co). La relation fondamentale est la suivante :

La dureté (HV 1200-1800) et la ténacité (K_{IC} 8-16 $\text{MPa}\cdot\text{m}^{1/2}$) présentent généralement une tendance inverse. Une dureté élevée (telle que HV 1600-1800) s'accompagne souvent d'une ténacité plus faible (K_{IC} 8-10 $\text{MPa}\cdot\text{m}^{1/2}$), tandis qu'une ténacité élevée (K_{IC} 14-16 $\text{MPa}\cdot\text{m}^{1/2}$) entraîne généralement une diminution de la dureté (HV 1200-1400). Cela est dû au fait que la dureté et la ténacité reposent sur des micromécanismes différents : la dureté est principalement due à la dureté élevée de la phase WC, tandis que la ténacité dépend de la capacité de déformation plastique de la phase Co.

La dureté (HV 1200-1800) et la ténacité à la rupture (K_{IC} 8-16 $\text{MPa}\cdot\text{m}^{1/2}$) du carbure cimenté sont ses principales propriétés mécaniques, qui affectent directement sa fiabilité dans des charges élevées ($> 4000 \text{ MPa}$), des environnements d'impact ($> 500 \text{ Hz}$) et des températures élevées ($> 800^\circ\text{C}$).

(7) Le compromis entre dureté et ténacité est un défi majeur dans la conception du carbure cimenté

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

Une dureté élevée ($HV > 1\ 600$) s'accompagne généralement d'une faible ténacité ($K_{Ic} < 10\text{ MPa}\cdot\text{m}^{1/2}$), ce qui peut facilement conduire à une rupture fragile ; tandis qu'une ténacité élevée ($K_{Ic} > 12\text{ MPa}\cdot\text{m}^{1/2}$) réduira la dureté ($HV < 1\ 400$) et affaiblira la résistance à l'usure. Afin d'équilibrer les deux, il est nécessaire d'optimiser la microstructure, notamment la granulométrie du WC ($0,2$ à $2\ \mu\text{m}$) et la teneur en phase liante au cobalt (6 à 15%), pour répondre aux besoins d'applications exigeantes telles que les outils aéronautiques (durée de vie de coupe > 15 heures) et les forets miniers (forage $> 1\ 200\text{ m}$).

Cette section traite du mécanisme de régulation de l'équilibre dureté-ténacité sous trois aspects : l'effet de la taille des grains (basé sur la relation Hall-Petch), l'optimisation de la teneur en phase de liaison Co et les technologies avancées (telles que la technologie nanocomposite et la conception de structures à gradient). Elle combine des modèles mécaniques (Hall-Petch : $\sigma_y \sim d^{-1/2}$, renforcement Orowan), la thermodynamique (énergie d'interface $< 1,5\text{ J/m}^2$) et les paramètres du procédé (température de frittage $1400\text{-}1500^\circ\text{C}$, degré de vide $< 10^{-2}\text{ Pa}$).

7.1.1 Effet de la taille des grains (relation Hall-Petch)

7.1.1.1 Effet de la taille des grains

L'effet de la taille des grains fait référence aux changements réguliers des propriétés mécaniques (telles que la dureté, la résistance et la ténacité) de matériaux tels que le carbure cémenté avec des changements de taille des grains. Selon la relation Hall-Petch, une diminution de la taille des grains (par exemple de $2\ \mu\text{m}$ à $0,5\ \mu\text{m}$) augmentera la densité des joints de grains ($> 10^{13}\text{ m}^{-2}$), entravera le mouvement des dislocations et augmentera ainsi la dureté (d'environ 25 à 30% , par exemple HV de $1\ 200$ à $1\ 600$) et la résistance.

Principe et technologie de l'effet de la taille des grains

La taille des grains est un facteur clé dans la régulation de la dureté et de la ténacité du carbure cémenté, suivant la relation Hall-Petch ($\sigma_y = \sigma_0 + k \cdot d^{-1/2}$, où σ_y est la limite d'élasticité, d est la taille des grains et k est d'environ $0,3\text{ MPa}\cdot\text{m}^{1/2}$). La réduction de la taille des grains WC ($0,2\text{-}2\ \mu\text{m}$) peut augmenter considérablement la dureté ($HV\ 1200\text{-}1800$) et la résistance à la compression ($> 4000\text{ MPa}$). Par exemple, après que la taille des grains est affinée de $2\ \mu\text{m}$ à $0,5\ \mu\text{m}$, la dureté est augmentée de HV 1200 à HV 1600 et la durée de vie de coupe des outils d'aviation est augmentée de 12 heures à 15 heures. Cependant, des grains trop petits ($< 0,2\ \mu\text{m}$) peuvent induire des microfissures dues au glissement des joints de grains (vitesse $\sim 10^{-9}\text{ m/s}$), entraînant une diminution de la ténacité ($K_{Ic} < 8\text{ MPa}\cdot\text{m}^{1/2}$). Par conséquent, l'optimisation de la taille des grains nécessite un équilibre entre le renforcement des joints de grains et la stabilité de l'interface.

Français La granulométrie est régulée par broyage à billes à haute énergie (vitesse $300\text{-}500\text{ tr/min}$, durée $20\text{-}40$ heures), ajout d'inhibiteurs de grains (tels que VC $0,2\%\text{-}0,5\%$, Cr_3C_2 $0,1\%\text{-}0,3\%$) et optimisation du processus de frittage (température $1400\text{-}1500^\circ\text{C}$, degré de vide $< 10^{-2}\text{ Pa}$). Ces dernières années, les carbures cémentés à grains ultrafins ($< 0,5\ \mu\text{m}$) et nanocristallins ($< 100\text{ nm}$) sont devenus un point chaud de la recherche, et leur dureté peut atteindre HV 2000 , mais le problème

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

de la stabilité des joints de grains doit être résolu (taux de migration des joints de grains $<10^{-10}$ m/s).

7.1.1.2 Mécanisme de Hall-Petch et analyse mécanique

Quelle est la relation Hall-Petch ?

La relation de Hall-Petch est un principe fondamental très important en science des matériaux . Elle décrit la relation entre la granulométrie d'un matériau polycristallin et sa limite d'élasticité . Découverte et formulée indépendamment par EO Hall (1951) et NJ Petch (1953), cette relation porte donc leur nom. En termes simples, la relation de Hall-Petch :

Plus les grains sont fins, plus la résistance (en particulier la limite d'élasticité) du matériau est élevée.

Cette relation peut être exprimée mathématiquement comme suit :

$$\sigma_y = \sigma_0 + k \cdot d^{-1/2}$$

dans:

σ_y : Limite d'élasticité du matériau.

σ_0 : représente la limite d' élasticité du matériau **monocristallin** , ou plus généralement, la résistance au mouvement de dislocation à l'intérieur du grain (contrainte de frottement du réseau).

k: La pente de Hall-Petch est une **constante** dont la valeur dépend du matériau lui-même (structure cristalline, caractéristiques de dislocation, etc.) et des propriétés du joint de grains (énergie et résistance au glissement du joint de grains, par exemple). Plus la valeur de k est élevée, plus l'effet de renforcement du joint de grains est important.

d : diamètre moyen des grains du matériau .

Mécanisme physique de base : les joints de grains entravent le mouvement des dislocations

Luxation et déformation plastique

La déformation plastique des matériaux métalliques est principalement obtenue par le glissement de dislocations (défauts linéaires dans les cristaux) au sein des grains.

Les joints de grains comme barrières

Les joints de grains sont des interfaces entre grains adjacents. En raison des différentes orientations cristallines des grains adjacents, il est difficile pour les dislocations de glisser directement d'un grain à l'autre à travers le joint de grains.

Accumulation de luxations

Sous l'action d'une contrainte externe, des sources de dislocations sont activées et des dislocations sont générées. Ces dislocations se déplacent le long du plan de glissement jusqu'à être bloquées par le joint de grains, formant un « empilement de dislocations » devant ce dernier.

Concentration de contraintes et activation de sources de dislocations dans les grains adjacents

L'accumulation de groupes de dislocations produit une importante concentration locale de contraintes au joint de grain. Lorsque cette concentration atteint la contrainte nécessaire pour activer

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

la source de dislocation dans le grain adjacent, la déformation plastique peut se propager au grain suivant et le matériau cède à l'échelle macroscopique.

Raffinage du grain

Plus les grains sont fins (plus d est petit), plus la surface intergranulaire par unité de volume est importante et plus le libre parcours moyen de glissement des dislocations est court. Les dislocations rencontrent des obstacles intergranulaires à une distance plus courte, et une contrainte externe plus importante est nécessaire pour former un groupe d'empilement de dislocations suffisamment fort dans les grains (générant ainsi une concentration de contrainte suffisamment élevée) pour activer la source de dislocations des grains adjacents. Par conséquent, la limite d'élasticité σ_y du matériau augmente avec la diminution de la taille des grains d .

Importance de la relation Hall-Petch

L'un des mécanismes de renforcement les plus importants

Le raffinement des grains est l'une des méthodes les plus efficaces et les plus couramment utilisées pour améliorer la résistance des matériaux métalliques, et ne réduit généralement pas de manière significative la ténacité du matériau (il peut même améliorer la ténacité, ce qui est là où il est supérieur à d'autres mécanismes de renforcement tels que le renforcement par solution solide et le renforcement par précipitation).

Conception du matériel d'orientation

Elle fournit une base théorique et des outils quantitatifs pour optimiser les propriétés mécaniques des matériaux en contrôlant leur microstructure (notamment la granulométrie). L'un des objectifs principaux des procédés métallurgiques (tels que le laminage contrôlé, le traitement thermique, etc.) est d'affiner les grains.

Comprendre l'effet de taille

Explique pourquoi les matériaux nanocristallins ont une résistance extrêmement élevée.

La relation Hall-Petch **est très valable dans la gamme de granulométrie allant du micromètre au submicromètre** (généralement d'environ $1\ \mu\text{m}$ à $0,1\ \mu\text{m}$). Lorsque la taille des grains diminue jusqu'à **l'échelle nanométrique** ($< 100\ \text{nm}$), d'autres mécanismes (tels que le glissement des joints de grains, l'absorption ou l'émission de dislocations aux joints de grains) peuvent devenir dominants, et parfois même l'« effet Hall-Petch inverse » est observé, c'est-à-dire que l'intensité diminue avec une réduction supplémentaire de la taille des grains.

Ce type de matériau s'applique principalement aux métaux et alliages. Des relations similaires sont observées dans les céramiques et certains polymères, mais les mécanismes de renforcement peuvent être différents.

Français La relation Hall-Petch montre que plus la taille des grains est petite, plus la densité des joints de grains est élevée ($> 10^{13}\ \text{m}^{-2}$), le mouvement des dislocations est entravé et la résistance

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

et la dureté sont significativement améliorées. La dureté (HV) est approximativement proportionnelle à la limite d'élasticité ($HV \sim 3\sigma_y$). Lorsque la taille des grains diminue de 2 μm à 0,5 μm , la dureté augmente d'environ 25 à 30 % (de HV 1200 à 1600). Cependant, si la taille des grains est trop petite ($< 0,2 \mu m$), le glissement des joints de grains s'intensifie, ce qui entraîne une diminution de la ténacité (K_{Ic} chute de $12 \text{ MPa} \cdot \text{m}^{1/2}$ à $< 8 \text{ MPa} \cdot \text{m}^{1/2}$). Le mécanisme est basé sur le renforcement des joints de grains et la mécanique de la rupture : les joints de grains améliorent les performances en fixant les dislocations (renforcement d'Orowan, $\tau \sim Gb / \lambda$, $\lambda < 1 \mu m$), mais une densité élevée des joints de grains augmente l'énergie interfaciale ($> 1,5 \text{ J/m}^2$) et induit facilement des microfissures (longueur 0,05-0,1 μm).

Français L'analyse de la dynamique des joints de grains montre que la vitesse de migration des joints de grains (10^{-10} m/s) est contrôlée par la température de frittage (1400-1500 °C) et les additifs (VC 0,2 %-0,5 %), et que la barrière de migration est de 80-120 kJ/mol. La stabilité thermodynamique du WC à grains fins est évaluée par l'énergie libre de Gibbs ($\Delta G < 0$). Lorsque la taille des grains est $< 0,5 \mu m$, l'énergie d'interface domine le changement de performance. Par exemple, le WC-10Co (grain 0,5 μm) a une dureté de HV 1600 et un K_{Ic} de $12 \text{ MPa} \cdot \text{m}^{1/2}$, ce qui convient à la coupe à grande vitesse ($> 800 \text{ m/min}$).

7.1.1.3 Analyse des facteurs affectant l'effet de la taille des grains

L'effet de la taille des grains est affecté par les facteurs suivants :

Taille initiale des particules de poudre

La taille des particules de poudre WC est de 0,5 à 1 μm pour assurer un raffinement uniforme ; si elle est $> 2 \mu m$, la dureté est < 1400 ; si elle est $< 0,2 \mu m$, le taux d'agglomération est $> 15 \%$.

Temps de broyage à boulets

Le broyage à boulets pendant 20 à 40 heures (vitesse de rotation 300 à 500 tr/min) peut affiner les grains à 0,5 μm ; si < 15 heures, la taille des grains est $> 1 \mu m$; si > 50 heures, le taux de rupture des grains est $> 3 \%$.

Température de frittage

1400-1500°C peuvent contrôler la croissance des grains ($< 0,8 \mu m$) ; si $> 1550^\circ\text{C}$, la taille des grains est $> 2 \mu m$ et la dureté diminue de 10%-15%.

additif

L'ajout de VC de 0,2 à 0,5 % peut inhiber la croissance des grains ($< 0,5 \mu m$) et augmenter la dureté de 5 à 10 %. Si $> 0,8 \%$, une phase cassante se forme, ce qui entraîne une valeur $K_{Ic} < 8 \text{ MPa} \cdot \text{m}^{1/2}$.

Contenu Co

Une teneur en Co de 8 à 12 % peut équilibrer la ténacité ; si $< 6 \%$, $K_{Ic} < 10 \text{ MPa} \cdot \text{m}^{1/2}$; si $> 15 \%$, dureté < 1200 .

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

Atmosphère de frittage : Un degré de vide $< 10^{-2}$ Pa peut éviter l'oxydation (teneur en $O_2 < 0,5$ ppm) ; l'utilisation d'une atmosphère Ar (pureté $> 99,99\%$) peut réduire les défauts aux limites des grains ($< 0,2\%$).

Taux de refroidissement

Le contrôle de la vitesse de refroidissement à $3-5^{\circ}\text{C}/\text{min}$ peut réduire la contrainte thermique (< 100 MPa) ; si $> 10^{\circ}\text{C}/\text{min}$, le taux de microfissures est $> 0,5\%$.

Avantages, inconvénients et exigences techniques de la relation Hall-Petch

Le raffinement du grain améliore considérablement la dureté et la résistance (HV 1600, $\sigma > 4500$ MPa), ce qui le rend adapté aux applications à forte charge (telles que les outils aéronautiques).

Des grains trop petits ($< 0,2\ \mu\text{m}$) entraîneront une diminution de la ténacité ($K_{IC} < 8\ \text{MPa}\cdot\text{m}^{1/2}$) et le coût de préparation du WC nanocristallin est plus élevé (augmentation d'environ 20 à 25 %).

Conditions techniques de la relation Hall-Petch

Un équipement de broyage à boulets de haute précision (précision de vitesse ± 5 tr/min), une surveillance des grains en ligne (écart $< 0,02\ \mu\text{m}$) et un four de frittage à haute température et haute pression (écart de température $< \pm 10^{\circ}\text{C}$, écart de pression $< \pm 10^{-3}$ Pa) sont nécessaires.

Stratégie d'optimisation

pour la relation Hall-Petch Pour obtenir une dureté élevée (HV 1600) et une ténacité modérée ($K_{IC} > 12\ \text{MPa}\cdot\text{m}^{1/2}$), la stratégie suivante est recommandée :

Sélectionnez de la poudre WC avec une granulométrie de $0,5$ à $1\ \mu\text{m}$ et effectuez un broyage à billes à haute énergie pendant 20 à 40 heures (vitesse de rotation de 300 à 500 tr/min).

La température de frittage est contrôlée à $1400-1500^{\circ}\text{C}$, le degré de vide est $< 10^{-2}$ Pa et la taille des grains est $< 0,8\ \mu\text{m}$.

L'ajout de $0,2$ à $0,5\%$ de VC peut inhiber la croissance des grains et augmenter la dureté de 5 à 10% .

La teneur en Co est fixée à $8-12\%$ pour garantir que $K_{IC} > 12\ \text{MPa}\cdot\text{m}^{1/2}$.

avec surveillance de la taille des particules en ligne (écart $< 0,02\ \mu\text{m}$).

La taille des grains a été vérifiée à l'aide d'une analyse TEM (résolution $< 0,1\ \text{nm}$) et la contrainte aux limites des grains (< 100 MPa) a été évaluée à l'aide de la DRX (écart de largeur de pic $< 0,2^{\circ}$).

Technologie avancée : Essayer la technologie nanocomposite pour former une structure bimode (distribution granulométrique : $0,2\ \mu\text{m}$ et $1\ \mu\text{m}$) en ajoutant des nanoparticules de WC ($< 50\ \text{nm}$), la dureté est augmentée à HV 1800 et le K_{IC} atteint $13\ \text{MPa}\cdot\text{m}^{1/2}$.

Pratique d'application de l'ingénierie des relations Hall-Petch

Le carbure cémenté à grains fins fonctionne bien dans une variété de scénarios :

Outils d'aviation

Le WC-10Co (granulométrie $0,5\ \mu\text{m}$, dureté HV 1600) a une durée de vie de 15 heures et une

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

amélioration des performances de 25 % en coupe à grande vitesse (> 800 m/min).

Trépan de forage minier

Le WC-8Co (granulométrie $0,8 \mu\text{m}$, K_{1c} c $13 \text{ MPa}\cdot\text{m}^{1/2}$) a une durée de vie de 1 200 m dans le forage de roche dure, soit une augmentation de 40 %.

Moule résistant à l'usure

WC-12Co (granulométrie $0,5 \mu\text{m}$, dureté HV 1600), durée de vie $>10^6$ fois en extrusion.

Aubes de turbine d'aviation

WC-10Co (granulométrie $0,4 \mu\text{m}$, VC 0,3%), dureté HV 1700, K_{1c} c $12 \text{ MPa}\cdot\text{m}^{1/2}$, en coupe à haute température ($>800^\circ\text{C}$, vitesse >250 m/s), la durée de vie atteint 20 heures, soit une augmentation de 30%.

Moule pour batterie à énergie nouvelle

WC-10Co (granulométrie $0,3 \mu\text{m}$, dureté HV 1800), en extrusion haute fréquence (> 500 Hz), durée de vie $> 10^6$ fois, soit une augmentation de 50

7.1.2 Optimisation de la teneur en phase de liaison en carbure cimenté

Relation entre le type, la teneur et la ténacité de la phase de liaison du carbure cimenté

La ténacité du carbure cimenté (représenté par WC-Co) est étroitement liée au type et à la teneur de la phase de liaison, ainsi qu'à la structure de la phase dure. L'optimisation de la teneur en phase de liaison (en particulier la teneur en cobalt) est essentielle pour équilibrer la dureté et la ténacité du matériau, et sa plage de contrôle typique est comprise entre 6 et 15 %. Voici une analyse systématique :

7.1.2.1 Le rôle central de la phase de cautionnement et de la réglementation technique

Les performances du carbure cimenté sont déterminées par la phase dure (carbures tels que WC) et la phase de liaison métallique (principalement Co).

Les fonctions principales de Co :

Porteur de déformation plastique : Lorsque la fissure se propage (la vitesse de déformation est d'environ 10^{-3} s^{-1}), elle absorbe de l'énergie par déformation plastique et contribue directement à la ténacité (K_{1c} c $8-16 \text{ MPa}\cdot\text{m}^{1/2}$).

Interface de liaison : Excellente mouillabilité au WC (angle de contact $<15^\circ$, énergie d'interface $<1,5 \text{ J/m}^2$), formant une interface de liaison à haute résistance ($>50 \text{ MPa}$).

Coordinateur de contraintes : soulage la concentration de contraintes entre les particules de WC et prévient la rupture fragile.

Principe technique de l'optimisation du contenu

Le contenu Co doit être contrôlé avec précision dans la plage de 6 à 15 % :

Faible teneur en Co ($<6\%$) : La dureté est considérablement améliorée (HV >1600), mais la ténacité diminue fortement ($K_{1c} < 10 \text{ MPa}\cdot\text{m}^{1/2}$) et une rupture fragile est susceptible de se produire.

Haute teneur en Co ($> 15\%$) : ténacité améliorée ($K_{1c} > 14 \text{ MPa}\cdot\text{m}^{1/2}$), mais dureté insuffisante (HV < 1200) et formation facile d'un bain de Co (taille $> 5 \mu\text{m}$), entraînant une diminution de 10

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

à 15 % de la résistance.

Point d'équilibre optimal (8%-12%) : Obtenez une synergie entre la dureté HV 1500 et la ténacité K_{IC} 12 MPa·m^{1/2} pour répondre aux scénarios à forte demande tels que les outils aéronautiques.

Technologie de mise en œuvre :

Contrôle de l'uniformité de la distribution du Co (écart < 0,5 %) grâce à un rapport poudre de Co haute pureté (> 99,9 %) → pressage isostatique à froid (NEP, 200-300 MPa) → frittage en phase liquide (1400-1500 °C, 1 à 3 heures). La technologie révolutionnaire de ces dernières années est la conception de structures à gradient : en régulant la vitesse de diffusion du Co (< 10⁻⁹ cm²/s), la teneur en Co en surface est réduite à 6 % (dureté HV 1600) et la teneur interne est augmentée à 12 % (ténacité K_{IC} 14 MPa·m^{1/2}), obtenant ainsi « une surface dure et un intérieur résistant ».

7.1.2.2 Effet quantitatif de la teneur en liant sur la ténacité

La teneur en Co est positivement corrélée à la ténacité, mais le point d'inflexion des performances doit être évité :

Mécanisme d'amélioration de la ténacité : Augmentation de la teneur en Co (6%→12%) → épaissement de la couche métallique → expansion de

l'espace de déformation plastique → la propagation des fissures doit passer par une zone plastique plus épaisse, augmentant K_{IC} de 10 MPa·m^{1/2} à 14 MPa·m^{1/2} ($K_{IC} \propto Co^{1/2}$).

Risque de défaillance critique :

Lorsque la teneur en Co est > 15 %, la fraction volumique de la phase dure est trop faible (WC représente < 85 %) et la dureté tombe en dessous de HV 1200 ;

Lorsque la température de frittage est > 1550 °C ou que l'écart de distribution du Co est > 1 %, un bassin de Co (> 5 μm) se forme, qui devient la source de fissures et la ténacité diminue de 10 à 15 %.

Support de modèle mécanique :

modèle Voigt de matériaux composites :

$$E = V_{WC} \cdot E_{WC} + V_{Co} \cdot E_{Co}$$

Propriétés quantitatives : Dureté théorique de l'alliage WC-10Co HV 1500, K_{IC} 12 MPa·m^{1/2}.

7.1.2.3 Relation hiérarchique entre le type de phase de liaison et la ténacité

Cobalt (Co) - L'étalon-or :

L'énergie de dislocation élevée confère une excellente capacité de glissement de dislocation, un effet de durcissement significatif et le système WC-Co présente la meilleure ténacité.

Alliages à base de nickel (Ni) - alternatives résistantes à la corrosion :

Utilisé dans TiC - Ni - Mo, Cr₃C₂ - NiCr et d'autres systèmes, mais contraint par le squelette en carbure, la ténacité est nettement inférieure à celle du WC-Co avec la même teneur (comme l'alliage

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

à base de TiC , K_{Ic} est généralement $<10 \text{ MPa} \cdot \text{m}^{1/2}$) .

Inconvénients de ténacité des systèmes spéciaux :

Bien que les alliages à base de carbures métalliques (tels que les squelettes continus TiC et Cr_3C_2) puissent améliorer la ténacité dans une certaine mesure en augmentant la teneur en Ni, ils sont essentiellement limités par :

- Fragilité intrinsèque des carbures ;
- La plasticité de la phase métallique est limitée par le squelette ;
- La force de liaison de l'interface est plus faible que celle du Co-WC.

7.1.2.4 Stratégie de compromis solide et d'optimisation collaborative

Nature contradictoire

Teneur en Co↑ → ténacité↑↑ mais dureté↓↓. Les matériaux homogènes traditionnels ont du mal à répondre à des exigences extrêmes.

Chemin de la percée

Affinage du grain :

Contrôler la taille des particules de WC à $0,5\text{-}1 \mu\text{m}$ (si $> 2 \mu\text{m}$, Le K_{Ic} diminue de 5 à 10 %) et utilise un renforcement à grains fins pour améliorer à la fois la résistance et la ténacité.

Conception de la structure du gradient :

Faible teneur en Co (6%) en surface : permet d'obtenir une dureté élevée (HV 1600) et de résister à l'usure ;

Teneur interne élevée en Co (12%) : assure une ténacité élevée ($K_{Ic} 14 \text{ MPa} \cdot \text{m}^{1/2}$) et une résistance à la fracture par impact ;

Technologie clé : ajouter 0,2 % à 0,5 % de VC pour inhiber la diffusion du Co, combiné à un frittage en couches pour contrôler le gradient de composition.

Contrôle de précision du processus :

Frittage : $1400\text{-}1500^\circ\text{C}$ /degré de vide $<10^{-2} \text{ Pa}$, durée 1-3 heures (si >4 heures, taux de ségrégation de Co $>1\%$) ;

Moulage : pression CIP 200-300 MPa, assurer une densité $> 99 \%$ (si $< 150 \text{ MPa}$, porosité $> 1 \%$) ;

Contrôle qualité : EDS/EBSD (résolution $< 0,5 \mu\text{m}$) a été utilisé pour analyser la distribution du Co, avec un écart de $< 0,5 \%$.

7.1.2.5 Vérification des pratiques d'ingénierie

La conception optimisée de la phase de liaison fonctionne bien dans des conditions de travail extrêmes :

Scénario d'application	Système matériel	Paramètres de performance	Amélioration de la durée de vie
Outils de finition pour l'aviation	WC-10Co ($0,5 \mu\text{m}$)	HV 1500, $K_{Ic} 12 \text{ MPa} \cdot \text{m}^{1/2}$	>15 heures (+25%)
Forage en haute mer	Gradient WC-Co (6% en	Tableau HV 1600/ K_{Ic} interne 14	$>1500 \text{ m}$ (+50%)

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

Scénario d'application	Système matériel	Paramètres de performance	Amélioration de la durée de vie
	surface/12% à l'intérieur)	$\text{MPa} \cdot \text{m}^{1/2}$	
Moule de plaquette de frein pour train à grande vitesse	Gradient WC-10Co	Frottement à haute température > 600°C	>4×10 ⁵ fois (+60%)
Foret à percussion pour mines	WC-8Co	$K_{IC} 13 \text{ MPa} \cdot \text{m}^{1/2}$	>1200 m (+40%)

7.1.2.6 Reconnaissance finale

La teneur en Co est au cœur du contrôle de la ténacité : elle est optimisée avec précision dans la plage de 6 à 15 %, et 8 à 12 % est le point d'or de l'équilibre résistance-ténacité ;

Le processus détermine la limite supérieure de performance :

S'appuyant sur des matières premières de haute pureté (Co>99,9%), un frittage de précision (contrôle de température $\pm 2^\circ\text{C}$) et des tests non destructifs (écart rayons X/EDS <0,2%) ;

La structure à gradient est une technologie révolutionnaire qui brise le compromis entre résistance et ténacité, mais le coût augmente de 15 à 20 % ;

Conception orientée application :

Scénarios à haute ténacité (exploitation minière, haute mer) → teneur en Co moyenne à élevée (10 à 15 %) ou conception à gradient ;

Scénario de dureté élevée (finition) → faible teneur en Co (6%-8%) + WC à grain fin (0,5 μm) + additifs VC ;

Résistance à la corrosion/scénario à haute température → Les alliages de phase de liaison à base de nickel nécessitent un compromis en termes de ténacité.

La ténacité du carbure cimenté résulte essentiellement de l'effet synergique de la teneur, du type et de la microstructure de la phase de liaison. Grâce à une optimisation scientifique de la teneur en Co (6 %-15 %), à une conception innovante à gradient et à un contrôle précis du procédé, il repousse les limites des performances traditionnelles et répond aux exigences les plus extrêmes, de la découpe au micron au forage kilométrique.

7.2 Résistance à la fatigue et aux chocs du carbure cimenté

Résistance à la fatigue

La résistance à la fatigue du carbure cimenté (WC-Co) fait référence à sa capacité à résister à l'initiation et à l'expansion des fissures de fatigue sous charge cyclique, reflétant la durabilité du matériau à long terme. Elle repose principalement sur l'optimisation de la microstructure (comme la taille des grains de 0,5 à 1 μm) pour réduire le taux de croissance des fissures, une teneur modérée en Co (8 à 12 %) fournit un tampon plastique et le renforcement des joints de grains empêche la croissance des fissures. Des méthodes de mesure telles que l'essai de fatigue en flexion rotative (ASTM E466) peuvent évaluer sa durée de vie en fatigue.

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

aux chocs

est la capacité du carbure cimenté à résister à la fracture sous des charges d'impact à haute énergie, ce qui témoigne de sa fiabilité sous charge dynamique. Elle repose sur une teneur élevée en Co (10 à 15 %) pour absorber l'énergie d'impact, une granulométrie modérée (0,5 à 1 μm) pour équilibrer ténacité et résistance, et des additifs (comme le TaC) pour renforcer les joints de grains. L'essai de choc Charpy (ASTM E23) est une méthode de mesure courante.

La résistance à la fatigue se concentre sur l'uniformité de la microstructure et la résistance à la propagation des fissures, tandis que la résistance aux chocs dépend davantage de l'absorption d'énergie plastique de la phase Co. Ces deux éléments doivent être équilibrés par l'optimisation de la microstructure afin de répondre aux exigences des différentes conditions de travail.

Français La résistance à la fatigue et aux chocs du carbure cimenté sous charge cyclique ($> 10^5$ fois) et impact élevé (> 500 Hz) détermine directement sa fiabilité dans l'exploitation minière (forage > 1200 m), l'aviation (durée de vie de l'outil > 15 heures) et la filière (extrusion $> 10^6$ fois). La résistance à la fatigue est caractérisée par la vitesse de croissance des fissures ($da/dN \sim 10^{-6}$ mm/cycle), et la résistance aux chocs est évaluée par l'énergie d'impact (10-30 J). L'optimisation doit commencer par la microstructure (taille des particules WC 0,5-2 μm , teneur en Co 6%-15%) et les propriétés mécaniques (facteur d'intensité de contrainte $\Delta K < 25 \text{ MPa} \cdot \text{m}^{1/2}$).

Cette section traite du mécanisme de régulation de la résistance à la fatigue et à l'impact sous trois aspects : la propagation des fissures sous chargement cyclique (basée sur la loi de Paris), l'essai de ténacité aux chocs (Charpy et Izod) et la technologie d'essai avancée (comme l'essai de fatigue SEM in situ). Combinant la mécanique de la rupture (loi de Paris : $da/dN = C \cdot \Delta K^m$), les normes expérimentales et les pratiques d'application, cette section traite du mécanisme de régulation de la résistance à la fatigue et à l'impact.

7.2.1 Croissance des fissures du carbure cimenté sous chargement cyclique (loi de Paris)

Qu'est-ce que la loi de Paris ?

La loi de Paris est un modèle théorique fondamental décrivant le comportement de la propagation des fissures de fatigue. Elle est principalement utilisée pour prédire la relation entre la vitesse de propagation des fissures et la plage de facteurs d'intensité de contrainte des matériaux soumis à des charges cycliques. Elle est largement utilisée dans l'analyse de la fatigue des métaux, des matériaux composites et des carbures cimentés (tels que le WC-Co).

expression de la loi de Paris

$$\frac{da}{dN} = C \cdot (\Delta K)^m$$

dans:

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

$\frac{da}{dN}$: 裂纹扩展速率 (mm/循环), 表示每循环裂纹长度的增量。

ΔK : 应力强度因子范围 ($\text{MPa}\cdot\text{m}^{1/2}$), $\Delta K = K_{\max} - K_{\min}$, 其中 $K_{\max}$ 和 $K_{\min}$ 分别为最大和最小应力强度因子。

C 和 m : 材料常数, 依赖于材料类型、微观结构及环境条件。

Pour le carbure cémenté, mmm est généralement compris entre 2 et 4 et CCC est plus petit ($\sim 10^{-1}$ à 10^{-8}).

Loi de Paris

La loi de Paris s'applique au stade stable de la croissance des fissures de fatigue (c'est-à-dire au stade II), c'est-à-dire que la vitesse de croissance des fissures a une relation de loi de puissance avec ΔK :

Stade I (zone seuil): $\Delta K < \Delta K_{\text{th}}$ (seuil), la fissure ne s'étend pas.

Stade II (zone d'extension stable): La fissure s'étend selon la loi de Paris.

Stade III (zone de fracture rapide): $\Delta K \rightarrow K_c$ (ténacité à la fracture), instabilité des fissures.

Application de la loi de Paris au carbure cémenté

La résistance à la fatigue du carbure cémenté (WC-Co) peut être analysée par la loi de Paris:

Micromécanisme: La propagation des fissures est affectée par les joints de grains WC et la phase Co, et la déflexion des joints de grains et l'énergie d'absorption plastique du Co réduisent d_a/d_N .

Facteurs affectant la loi de Paris

Teneur en Co: Une teneur en Co plus élevée (10 à 15 %) augmente la plasticité et réduit le mmm.

Taille des grains: Les grains modérés ($0,5-1 \mu\text{m}$) réduisent d_a/d_N grâce au renforcement des joints de grains.

Environnement: Les environnements corrosifs (par exemple $\text{pH} < 5$) peuvent augmenter le CCC.

Mesure: Par essai de croissance de fissure (ASTM E647), enregistrer d_a/d_N Relation avec ΔK , ajustement CCC et mmm.

importance

La loi de Paris fournit une base théorique pour prédire la durée de vie en fatigue du carbure cémenté.

Elle permet d'optimiser la microstructure (comme la granulométrie et la teneur en Co) et de prolonger la durée de vie en fatigue. Elle est adaptée aux scénarios de chargement à cycles élevés, tels que les outils aéronautiques et les forets miniers.

Principe de la loi de Paris et aperçu technique

La résistance à la fatigue est caractérisée par la vitesse de croissance des fissures (da/dN , unité: mm/cycle), qui suit la loi de Paris: $da/dN = C \cdot \Delta K^m$

m, où ΔK est l'amplitude du facteur d'intensité de contrainte ($10^{-25} \text{ MPa}\cdot\text{m}^{1/2}$), C est 10^{-9} - 10^{-10} et m est 3-4.

Sous une charge cyclique (rapport de contrainte $R = 0,1$, fréquence 5-15 Hz), la vitesse de croissance des fissures du carbure cémenté doit être contrôlée à $< 10^{-6}$ mm/cycle pour assurer une durée de vie $> 10^5$ fois. L'optimisation est obtenue par le raffinement du grain (WC $0,5-1 \mu\text{m}$), la teneur en Co (8%-12%) et la modification de surface (comme l'implantation ionique).

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

Les essais de fatigue reposent sur la mesure de la longueur des fissures (précision $\pm 0,02$ mm) sous flexion trois points (charge 500-1000 N). Ces dernières années, les essais de fatigue in situ par MEB (résolution $< 0,2$ μm) sont devenus un domaine de recherche majeur, permettant d'observer en temps réel les chemins de propagation des fissures (rapport transgranulaire /intergranulaire < 30 %) et les défauts microscopiques (taille des pores < 2 μm).

Loi de Paris - Mécanisme et analyse mécanique

La loi de Paris décrit le comportement de la croissance constante des fissures (stade II) :

Calcul de ΔK : $\Delta K = \Delta \sigma \cdot \sqrt{(\pi a)}$, où $\Delta \sigma$ est l'amplitude de contrainte et a est la longueur de la fissure ($\sim 0,1-0,5$ mm). Lorsque $\Delta K < 20 \text{ MPa} \cdot \text{m}^{1/2}$, $da/dN < 10^{-7}$ mm/cycle.

Paramètres C et m : C est compris entre 10^{-9} et 10^{-10} , m est compris entre 3,2 et 3,8, ce qui reflète la résistance du matériau à la fissuration. Lorsque la teneur en Co est de 10 %, C diminue de 15 à 20 %.

Micromécanisme : La phase Co dissipe l'énergie des fissures par déformation plastique (déformation $\sim 0,05\%-0,1\%$), et le joint de grain WC ($0,5$ μm) empêche la propagation des fissures (taux $< 10^{-6}$ mm/cycle).

Fatigue à haute température : à 800 $^{\circ}\text{C}$, le taux de croissance des fissures est $< 10^{-5}$ mm/cycle et la couche d'oxyde (WO_3 , épaisseur ~ 2 μm) peut réduire da/dN d'environ 5 à 10 %.

L'analyse SEM in situ montre que la propagation des fissures se fait principalement par fracture transgranulaire (ratio > 50 %), et que lorsque l'angle de déviation du joint de grain est compris entre 20° et 40° , le rapport da/dN diminue de 10 à 15 %. Par exemple, la vitesse de propagation des fissures du WC-10Co ($\Delta K = 15 \text{ MPa} \cdot \text{m}^{1/2}$) est d'environ 10^{-7} mm/cycle, ce qui répond aux exigences des outils aéronautiques.

Analyse des facteurs affectant la propagation des fissures

La propagation des fissures est affectée par les facteurs suivants :

Taille des grains : $0,5$ à 1 μm peut réduire da/dN ($< 10^{-7}$ mm / cycle) ; si > 2 μm , $da/dN > 10^{-6}$ mm/cycle.

Teneur en Co : 10 % peut optimiser K_{IC} ($> 12 \text{ MPa} \cdot \text{m}^{1/2}$) ; si < 6 %, da/dN augmente de 20 à 30 %.

Rapport de contrainte : lorsque $R=0,1$, $da/dN < 10^{-7}$ mm/cycle ; si $R>0,5$, da/dN augmente de 40%-50%.

Additifs : l'ajout de VC de 0,2 % à 0,5 % peut améliorer la résistance aux joints de grains (> 150 MPa) ; si $> 0,8$ %, le rapport de phase cassante est $> 0,5$ %.

Lorsque $R_a < 0,1$ μm , le temps d'initiation des fissures est $> 10^4$ fois ; si $> 0,2$ μm , la durée de vie diminue de 15 à 20 %.

Micro-défauts : Lorsque la porosité est < 1 %, $da/dN < 10^{-7}$ mm/cycle ; si > 2 %, da/dN augmente de 30 à 40 %.

Humidité ambiante : lorsque l'humidité relative est < 50 %, $da/dN < 10^{-7}$ mm/cycle ; si elle est > 80 %, la fatigue par corrosion entraîne une augmentation de da/dN de 20 à 25 %.

Le carbure cémenté présente une excellente résistance à la fatigue (durée de vie $> 10^5$ fois) et

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

convient aux scénarios de chargement cyclique à haute fréquence (comme les forets miniers). En environnement corrosif (humidité > 80 %), la durée de vie en fatigue diminue de 15 à 20 % et des revêtements de surface (tels que TiN, épaisseur 1 à 3 μm) sont nécessaires pour améliorer la résistance à la corrosion. Un testeur de fatigue de haute précision (écart de fréquence < 0,2 Hz), un MEB in situ (résolution < 0,2 μm) et un boîtier de contrôle environnemental (précision d'humidité $\pm 2\%$) sont requis.

Stratégie d'optimisation de la loi de Paris

Pour réduire le taux de croissance des fissures ($< 10^{-7}$ mm/cycle), les stratégies suivantes sont recommandées :

La taille des grains de WC est choisie entre 0,5 et 1 μm et la teneur en Co est de 10 %.

L'ajout de 0,2 à 0,5 % de VC peut améliorer la résistance des joints de grains et réduire le da/dN d'environ 15 à 20 %.

La surface est polie à $R_a < 0,1 \mu\text{m}$ et le temps d'initiation des fissures est $> 10^4$ fois.

Contrôler le rapport de contrainte $R=0,1$ pour garantir $\Delta K < 20 \text{ MPa} \cdot \text{m}^{1/2}$.

La surveillance des fissures en ligne (précision $\pm 0,02 \text{ mm}$) est utilisée pour garantir la cohérence des tests (écart $da/dN < 5\%$).

Densité frittée > 99,5 %, porosité < 1 %, combinée avec une machine d'essai de fatigue (écart de fréquence < 0,2 Hz).

Technologie avancée : L'application d'un revêtement TiN (épaisseur 1-3 μm , dureté HV 2500-3000) réduit les effets de la fatigue par corrosion et réduit le da/dN de 10 à 15 %.

Les performances du carbure cimenté résistant à la fatigue après optimisation **dans l'application technique de la loi de Paris sont excellentes :**

Trépan minier : WC-10Co (taux de croissance des fissures $\sim 10^{-7}$ mm/cycle), durée de vie $> 10^5$ fois en impact cyclique, distance de forage > 1200 m.

Outils d'aviation : WC-8Co ($K_{IC} 13 \text{ MPa} \cdot \text{m}^{1/2}$), durée de vie en fatigue $> 10^5$ fois, durée de vie de coupe > 15 heures.

Moule résistant à l'usure : WC-12Co ($\Delta K < 15 \text{ MPa} \cdot \text{m}^{1/2}$), temps d'extrusion $> 10^6$ fois, augmenté de 25 %.

Engrenages pour trains à grande vitesse : WC-10Co (granulométrie 0,5 μm , Revêtement TiN 2 μm), dans les cycles à haute fréquence ($> 100 \text{ Hz}$), le taux de croissance des fissures est d'environ 10^{-8} mm/cycle et la durée de vie est $> 10^6$ fois, soit une augmentation de 40 %.

7.2.2 Essai de ténacité aux chocs du carbure cimenté (Charpy et Izod)

Aperçu du principe et de la technologie du test de résistance aux chocs du carbure cimenté

La ténacité aux chocs est la capacité d'un alliage dur (WC-Co) à résister à la rupture sous des charges d'impact à haute énergie. C'est un indicateur clé de sa fiabilité dans des environnements de charge dynamique (tels que les impacts à haute fréquence ou les charges transitoires). La ténacité aux chocs se caractérise par sa capacité à absorber l'énergie d'impact, généralement exprimée en énergie

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

d'impact (unité : J), qui est principalement déterminée par la capacité de déformation plastique de la phase de liaison cobalt (Co) et la dureté de la phase dure carbure de tungstène (WC). L'essai de ténacité aux chocs est conçu pour simuler des conditions de travail réelles (telles que l'impact à haute fréquence de forêts minières ou la charge dynamique d'outils aéronautiques) afin d'évaluer la résistance à la rupture du matériau dans des environnements à fortes contraintes.

Aperçu de la méthode d'essai :

La ténacité aux chocs du carbure cimenté est principalement mesurée par deux méthodes d'essai normalisées : Charpy et Izod. Ces deux méthodes utilisent un pendule pour impacter l'échantillon et enregistrer l'énergie nécessaire à la rupture (travail d'impact). Cependant, il existe des différences significatives dans la méthode de fixation de l'échantillon, le mode de chargement et la répartition des contraintes.

Équipement d'essai :

Énergie du pendule : L'énergie standard du pendule est de 300 J.

Vitesse d'impact : 4-5 m/s.

Contrôle environnemental : la température ambiante (20-25 °C) est la condition d'essai standard. Les essais à basse ou haute température nécessitent des dispositifs de contrôle de température spécifiques.

Essais à vitesse de déformation élevée :

Ces dernières années, les essais à vitesse de déformation élevée (vitesse de déformation $> 10^3 \text{ s}^{-1}$) sont devenus un sujet de recherche majeur, permettant de simuler de manière plus réaliste des conditions de travail extrêmes telles qu'un impact explosif (vitesse $> 50 \text{ m/s}$) ou une découpe à grande vitesse. Sous des vitesses de déformation élevées, les matériaux présentent une sensibilité accrue à la vitesse de déformation et la ténacité aux chocs peut diminuer, ce qui nécessite une optimisation de la microstructure pour améliorer les performances.

Détails du test d'impact Charpy

Concept et principe :

L'essai de choc Charpy (ASTM E23) est une méthode classique d'essai de ténacité aux chocs. Il utilise une méthode de flexion en trois points pour mesurer l'énergie nécessaire à la rupture en frappant l'éprouvette avec un pendule. L'éprouvette a une section rectangulaire, généralement munie d'une entaille en V pour simuler les points de concentration de contraintes susceptibles d'exister en conditions réelles de travail. L'énergie d'impact reflète la capacité du matériau à absorber l'énergie et à résister à la propagation des fissures, et constitue un indicateur important de la résistance aux chocs du carbure cimenté.

Échantillon et méthode de chargement :

Spécifications de l'échantillon :

Taille standard : $55 \times 10 \times 10 \text{ mm}$ (longueur $\times$ largeur $\times$ hauteur).

Type d'encoche : encoche en V, profondeur 2 mm, rayon du fond de l'encoche 0,25 mm, angle de l'encoche 45°.

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

Effet d'entaille : une concentration de contrainte se forme à la pointe de l'entaille, induisant l'initiation de fissures, ce qui facilite la quantification de la sensibilité du matériau aux défauts.

Méthode de chargement :

L'échantillon est placé horizontalement sur deux points d'appui, et le pendule tombe librement d'une certaine hauteur, heurtant le centre de l'échantillon (le fond de l'entaille) à une vitesse de 4 à 5 m/s. L'échantillon est soumis à une contrainte de flexion en trois points, et la fissure part de la pointe de l'entaille et s'étend jusqu'à sa rupture.

Répartition des contraintes :

En flexion trois points, la contrainte de traction est générée au niveau de l'entaille de l'échantillon, la contrainte de traction maximale est concentrée au fond de l'entaille et le facteur de concentration des contraintes (K_t) est d'environ 2-3. L'énergie d'impact comprend l'énergie d'amorçage et l'énergie d'extension de fissure, l'énergie d'extension de fissure étant dominante.

Processus de test :

Traitement des échantillons : Les échantillons sont traités selon des dimensions standard et les encoches sont traitées par découpe au fil ou par des outils spéciaux pour garantir la précision du traitement ($\pm 0,02$ mm).

Contrôle environnemental : L'échantillon est placé à une température spécifiée (comme la température ambiante 20-25°C ou la basse température -40°C) et régulé dans une chambre de contrôle de température.

Chargement d'impact : relâchez le pendule, impactez l'échantillon, enregistrez la différence de hauteur du balancement du pendule et calculez le travail d'impact :

$$\text{冲击功} = m \cdot g \cdot (h_{\text{初}} - h_{\text{终}})$$

en m est la masse du pendule, g est l'accélération due à la gravité, h_{initial} et h_{final} sont respectivement les hauteurs initiale et finale .

Caractéristiques et applicabilité :

L'essai Charpy simule l'état de contrainte de flexion en trois points dans des conditions de travail réelles (comme la contrainte locale lorsque le trépan impacte la roche).

Il convient à l'évaluation de la résistance à la fracture du carbure cémenté dans un environnement à fort impact, en particulier des performances de ténacité en présence de défauts (encoches).

Les résultats des tests sont grandement affectés par la géométrie de l'encoche, la taille de l'échantillon et la température, et les conditions expérimentales doivent être strictement contrôlées.

Détails du test d'impact Izod

Concept et principe :

L'essai de choc Izod (ASTM E23) est une autre méthode d'essai de ténacité au choc normalisée. Il utilise la charge d'une poutre en porte-à-faux pour mesurer l'énergie nécessaire à la rupture en impactant l'extrémité libre de l'éprouvette avec un pendule. L'éprouvette est généralement entaillée pour évaluer la résistance du matériau à la concentration de contraintes et à la propagation des fissures. Comparé à l'essai Charpy, le mode de force de l'essai Izod est plus proche de certaines conditions de travail réelles (par exemple, impact d'une structure en porte-à-faux).

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

Échantillon et méthode de chargement :

Spécifications de l'échantillon :

Taille standard : 75 × 10 × 10 mm (longueur × largeur × hauteur).

Type d'encoche : encoche en V, profondeur 2 mm, rayon du fond de l'encoche 0,25 mm, angle de l'encoche 45°.

Position de l'encoche : L'encoche est située près de l'extrémité fixe de l'échantillon, à environ 22 mm de l'extrémité de serrage.

Méthode de chargement :

Une extrémité de l'échantillon est fixée au dispositif de fixation, tandis que l'autre extrémité est suspendue pour former une structure en porte-à-faux. Le pendule heurte l'extrémité libre de l'échantillon (le fond de l'entaille) à une vitesse de 4 à 5 m/s. L'échantillon est soumis à une contrainte mixte de flexion et de cisaillement. La fissure part de la pointe de l'entaille et s'étend jusqu'à sa rupture.

Répartition des contraintes :

En mode poutre cantilever, l'entaille produit une superposition de contraintes de traction et de cisaillement. La contrainte de traction maximale se situe au fond de l'entaille, et la contrainte de cisaillement est répartie dans le sens de l'épaisseur de l'éprouvette. Le facteur de concentration de contrainte (K_t) est d'environ 2,5 à 3,5, légèrement supérieur à celui de l'essai Charpy. La propagation de la fissure est affectée par la contrainte de cisaillement et peut se propager le long de l'interface WC-Co ou à travers le grain.

Processus de test :

Traitement des échantillons : Les échantillons sont traités selon des dimensions standard et la précision du traitement des entailles est contrôlée à $\pm 0,02$ mm.

Serrage de l'échantillon : L'échantillon est fixé dans le dispositif, garantissant que l'extrémité de serrage ne glisse pas ou ne se desserre pas.

Chargement d'impact : Le pendule est relâché pour impacter l'extrémité libre de l'échantillon, la différence de hauteur du pendule est enregistrée et l'énergie d'impact est calculée (la formule est la même que celle du test Charpy).

Caractéristiques et applicabilité :

L'essai Izod simule les conditions de contrainte d'une structure à poutre en porte-à-faux (par exemple un composant de machine soumis à un impact latéral).

Il convient à l'évaluation de la résistance aux chocs du carbure cémenté dans des états de contrainte complexes, en particulier dans les scénarios où la contrainte de cisaillement domine.

En raison de la méthode complexe de fixation de l'échantillon et de la répartition des contraintes, les résultats du test peuvent être légèrement inférieurs à ceux du test Charpy et sont sensibles aux conditions de serrage.

Comparaison des tests Charpy et Izod

Mode de contrainte : L'

essai Charpy est un essai de flexion en trois points, qui est principalement affecté par la contrainte de traction ; l'essai Izod est un essai de poutre en porte-à-faux, où la contrainte de traction et la contrainte de cisaillement sont superposées, et le chemin de propagation des fissures est plus

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

compliqué.

Fixation des échantillons :

les échantillons d'essai Charpy sont soutenus aux deux extrémités, ce qui simplifie la fixation ; les échantillons d'essai Izod sont serrés à une extrémité, ce qui impose des exigences plus élevées au dispositif de fixation.

Différence d'énergie d'impact :

En raison de la composante de contrainte de cisaillement plus importante de l'essai Izod, une plus grande énergie de croissance des fissures est dissipée et l'énergie d'impact est généralement légèrement inférieure à celle de l'essai Charpy.

Scénarios d'application : L'

essai Charpy est plus adapté à la simulation d'impacts symétriques (comme un foret heurté de plein fouet) ; l'essai Izod est plus adapté à la simulation d'impacts latéraux (comme des pièces mécaniques en porte-à-faux).

Base théorique et analyse des mécanismes

ténacité aux chocs reposent sur les principes de la mécanique de la rupture. L'énergie d'impact est liée à la ténacité à la rupture (K_{Ic}), qui peut être estimée indirectement par le taux de restitution d'énergie (G_c) :

$$K_{Ic} \approx \sqrt{E \cdot G_c}$$

où E est le module d'élasticité (environ 550-650 GPa pour WC-Co) et G_c est l'énergie de rupture (contribuée par la plasticité de la phase Co et la résistance à la croissance des fissures).

Mécanisme de l'essai Charpy :

l'échantillon est soumis à un impact de flexion en trois points, la contrainte est concentrée au niveau de l'entaille et la fissure se propage le long de sa pointe. Le joint de grain WC (granulométrie de 0,5 à 1 μm) augmente la résistance à la propagation en déviant la trajectoire de la fissure (angle de déviation de 20 à 40 °), et la phase Co absorbe l'énergie par déformation plastique (déformation de 0,05 à 0,1 %).

Mécanisme de l'essai Izod :

En mode de force de la poutre en porte-à-faux, la trajectoire de propagation de la fissure est affectée par la contrainte de cisaillement et peut s'étendre le long de l'interface WC-Co ou à travers le grain. La dissipation plastique de la phase Co et l'effet gênant du joint de grain WC sont similaires à ceux de l'essai Charpy, mais la contrainte de cisaillement complexifie la déflexion de la fissure.

Mécanisme microscopique :

Dissipation plastique de la phase Co : la phase Co absorbe l'énergie d'impact par déformation plastique et retarde la propagation des fissures. Lorsque la teneur en Co est de 10 %, la vitesse de déformation est d'environ $10^{-3} s^{-1}$ et la dissipation plastique est significative.

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

WC 晶界阻碍：WC 晶界通过 Orowan 强化机制 ($\tau \sim Gb/\lambda$, $\lambda < 1 \mu\text{m}$) 阻碍裂纹扩展，适中晶粒尺寸 (0.5-1 μm) 效果最佳。

Morphologie de la fracture : l'analyse SEM montre que la fracture est principalement composée de fossettes (taille $< 2 \mu\text{m}$), indiquant que la fracture plastique est dominante et que la déformation plastique de la phase Co est le principal mécanisme d'absorption d'énergie.

Impact environnemental :

Propriétés à basse température : À -40°C , la ténacité de la phase Co diminue légèrement, mais la teneur appropriée en Co (10%) maintient toujours la ténacité aux chocs grâce à la dissipation plastique.

Taux de déformation élevé : lorsque le taux de déformation est $> 10^3 \text{ s}^{-1}$, le taux de croissance des fissures augmente (environ 15 à 20 %) car le matériau n'a pas le temps de se déformer complètement de manière plastique.

Analyse des facteurs d'influence

La résistance aux chocs est affectée par les facteurs suivants :

Contenu du co:

Effet : L'augmentation de la teneur en Co ($> 10\%$) améliore la résistance aux chocs grâce à sa capacité de déformation plastique améliorée.

Mécanisme : Lorsque la teneur en Co est $< 6\%$, la fragilité du matériau augmente ; lorsqu'elle est $> 15\%$, la dureté diminue, affectant la résistance à l'usure.

Recommandation : Une teneur en Co de 10 à 12 % constitue le point d'équilibre entre la ténacité et la dureté.

Granulométrie :

Fonction : La granulométrie modérée (0,5-1 μm) optimise la résistance aux chocs.

Mécanisme : Des grains trop fins ($< 0,2 \mu\text{m}$) réduisent la ténacité en raison de l'augmentation des défauts aux joints de grains ; des grains trop grossiers ($> 2 \mu\text{m}$) réduisent la densité des joints de grains et réduisent la résistance à la propagation des fissures.

additif:

Fonction : L'ajout de VC ou de TaC améliore la résistance aux chocs.

Mécanisme : Le VC (0,2 %-0,5 %) inhibe la croissance des grains et renforce les joints de grains ; une quantité excessive ($> 0,8\%$) forme une phase cassante et réduit la ténacité.

Profondeur de l'encoche :

Effet : La profondeur de l'entaille augmente et la concentration de contrainte s'intensifie.

Mécanisme : Lorsque la profondeur de l'entaille est $> 3 \text{ mm}$, le facteur de concentration de contrainte augmente et la ténacité aux chocs diminue.

Norme : 2 mm est la profondeur de test standard.

Densité frittée :

Fonction : La haute densité améliore la résistance aux chocs.

Mécanisme : Lorsque la densité est $< 98\%$, la porosité augmente ($> 2\%$) et les pores deviennent des sources de fissures, réduisant la ténacité.

Recommandé : densité $> 99\%$, porosité $< 1\%$.

Température d'essai :

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

Effet : la basse température réduit la résistance aux chocs.

Mécanisme : Lorsque la température est inférieure à -60°C , la ténacité de la phase Co diminue significativement et la proportion de rupture fragile augmente.

Taux de déformation :

Effet : un taux de déformation élevé réduit la résistance aux chocs.

Mécanisme : Lorsque la vitesse de déformation est $> 10^3 \text{ s}^{-1}$, le matériau n'a pas suffisamment de temps pour se déformer plastiquement et la propagation des fissures est accélérée.

Stratégie d'optimisation

Pour améliorer la résistance aux chocs du carbure cimenté, les stratégies suivantes peuvent être adoptées :

Optimisation de la microstructure :

La teneur en Co est de 10 à 12 %, la taille des grains de WC est de 0,5 à 1 μm , équilibrant la ténacité et la dureté.

Contrôle additif :

L'ajout de 0,2 à 0,5 % de VC ou de TaC peut améliorer la résistance des joints de grains et la résistance aux chocs.

Contrôle du processus :

Densité frittée $> 99\%$, porosité $< 1\%$, obtenue par frittage sous vide ($1400-1500^{\circ}\text{C}$, vide $< 10^{-2} \text{ Pa}$).

Précision du test :

La précision d'usinage de la profondeur de l'encoche est de $\pm 0,02 \text{ mm}$ et l'écart d'énergie du pendule est $< 0,5 \text{ J}$.

Performances améliorées à basse température :

L'ajout de Ni (1%-3%) comme phase de liaison auxiliaire améliore la ténacité à basse température et maintient une ténacité élevée aux chocs à -60°C .

Analyse fractographique :

par SEM (résolution $< 0,2 \mu\text{m}$). La taille des fossettes était $< 2 \mu\text{m}$, indiquant que la fracture plastique était dominante.

Pratique d'application de l'ingénierie

Le carbure cimenté à haute résistance aux chocs fonctionne bien dans une variété de scénarios :

Trépan miniers : WC-10Co (teneur en Co 10%), avec microstructure optimisée pour répondre aux exigences d'impact haute fréquence ($> 500 \text{ Hz}$).

Outils aéronautiques : WC-8Co, adaptés au chargement dynamique en coupe à grande vitesse ($> 800 \text{ m/min}$).

Matrice résistante à l'usure : WC-12Co, résiste à l'emboutissage haute fréquence ($> 10^6$ fois).

Vanne pour eaux profondes : WC-10Co, performante en cas d'impact à haute pression ($> 80 \text{ MPa}$) en eaux profondes.

Moule de pale d'éolienne : WC-10Co (Ni 2%), stable à basse température (-60°C) et à taux de déformation élevé ($> 10^3 \text{ s}^{-1}$).

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

Essai de résistance aux chocs au carbure cimenté (Charpy et Izod) - Comparaison des tableaux

Ce qui suit est une comparaison directe des méthodes d'essai de ténacité aux chocs Charpy et Izod dans le carbure cimenté (WC-Co) sous la forme d'un tableau, couvrant les concepts, les spécifications des échantillons, les méthodes de chargement, la répartition des contraintes, le processus d'essai, les caractéristiques et l'applicabilité, les micromécanismes et les facteurs d'influence.

projet	Essai d'impact Charpy (ASTM E23)	Essai d'impact Izod (ASTM E23)
concept principe	La méthode de chargement par flexion trois points est adoptée. Le pendule impacte l'échantillon pour mesurer l'énergie nécessaire à la rupture (travail d'impact). L'échantillon présente une entaille en V pour simuler la concentration des contraintes et évaluer la résistance à la rupture.	La méthode de chargement par poutre en porte-à-faux est utilisée : le pendule frappe l'extrémité libre de l'échantillon pour mesurer l'énergie de rupture. L'échantillon est entaillé pour évaluer sa résistance à la concentration de contraintes et à la propagation des fissures.
Échantillon Spécification	- Dimensions : 55 × 10 × 10 mm (longueur × largeur × hauteur). - Encoche : en V, profondeur 2 mm, rayon du fond 0,25 mm, angle 45°.	- Dimensions : 75 × 10 × 10 mm (longueur × largeur × hauteur). - Encoche : en V, profondeur 2 mm, rayon du fond 0,25 mm, angle 45°, à environ 22 mm de l'extrémité de serrage.
charger Chemin	L'échantillon est placé horizontalement sur deux points d'appui et le pendule frappe le centre de l'échantillon (l'arrière de l'encoche) à une vitesse de 4 à 5 m/s, formant une force de flexion en trois points.	Une extrémité de l'échantillon est fixée au support, tandis que l'autre extrémité est suspendue pour former une poutre en porte-à-faux. Le pendule heurte l'extrémité libre de l'échantillon (le fond de l'entaille) à une vitesse de 4 à 5 m/s.
stresser distribué	La contrainte de traction est générée au niveau de l'entaille, et la contrainte de traction maximale est concentrée au fond de l'entaille, avec un facteur de concentration de contrainte (K _t) est d'environ 2-3. L'énergie d'impact provient principalement de l'énergie d'extension de la fissure.	La contrainte de traction maximale se situe au fond de l'entaille et la contrainte de cisaillement est répartie sur l'épaisseur. Le facteur de concentration des contraintes (K _t) est d'environ 2,5 à 3,5.
test processus	1. Traiter l'échantillon et l'entaille (précision ± 0,02 mm). 2. Placer à une température spécifiée (par exemple 20-25 °C ou -40 °C). 3. Impacter avec un pendule, enregistrer la différence de hauteur et calculer l'énergie d'impact : Énergie d'impact = m · g · (hinitial - hfinal) .	1. Traitez l'échantillon et l'encoche (précision ± 0,02 mm). 2. Fixez une extrémité de l'échantillon pour vous assurer qu'il n'est pas desserré. 3. Le pendule frappe l'extrémité libre, enregistre la différence de hauteur et calcule l'énergie d'impact (la formule est la même que Charpy).
Caractéristiques applicabilité	- Simule une contrainte de flexion en trois points (comme l'impact frontal d'une perceuse). - Convient pour évaluer la résistance à la fracture du carbure cimenté sous impact symétrique. - Les résultats sont grandement affectés par la géométrie de l'encoche et la température.	- Simule les forces des poutres en porte-à-faux (par exemple, impact latéral sur des pièces mécaniques). - Convient pour évaluer la résistance aux chocs du carbure cimenté sous des états de contrainte complexes. - Les résultats sont sensibles aux conditions de serrage.

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

projet	Essai d'impact Charpy (ASTM E23)	Essai d'impact Izod (ASTM E23)
Micro mécanisme	- Dissipation plastique de la phase Co : Similaire à - Dissipation plastique de la phase Co : la phase Co absorbe Charpy, la phase Co absorbe l'énergie de manière l'énergie par déformation plastique (déformation 0,05%-0,1%), plastique. - Obstruction des joints de grains WC : Le retardant la propagation des fissures. - Encombrement des joints chemin de fissure est plus compliqué et peut s'étendre de grains WC : les joints de grains (0,5-1 μ m) augmentent la le long de l'interface WC-Co ou à travers le grain sous résistance en déviant les fissures (angle 20°-40°). - Morphologie l'influence de la contrainte de cisaillement. - de fracture : les fossettes (taille < 2 μ m) dominant, indiquant une Morphologie de fracture : Principalement des fracture plastique.	
Influence facteur	- Teneur en Co : 10%-12% équilibre la ténacité et la dureté. - Teneur en Co : identique à Charpy, 10 à 12 % est Granulométrie : 0,5-1 μ m est optimale, trop fine ou trop grossière bon. - Granulométrie : 0,5 à 1 μ m est le meilleur. - réduit la ténacité. - Additifs : VC (0,2%-0,5%) renforce les joints Additifs : VC (0,2 à 0,5 %) a le même effet. - de grains, un excès (>0,8%) forme des phases cassantes. - Profondeur d'entaille : > 3 mm réduit la ténacité. - Profondeur d'entaille : >3 mm La concentration de contrainte Densité frittée : > 99 %, porosité < 1 %. - intensifie et réduit la ténacité. - Densité frittée : >99%, porosité Température : < -60 °C réduit la ténacité. - Vitesse de <1%. - Température : <-60°C La ténacité diminue. - Vitesse de déformation : > 10 ⁻³ s ⁻¹ accélère la croissance des déformation : >10 ⁻³ s ⁻¹ accélère la croissance des fissures (environ fissures, l'effet est légèrement supérieur à Charpy en 15%-20%).	

7.3 Analyse du mécanisme de rupture du carbure cémenté

Le carbure cémenté est sujet à l'usure (taux d'usure > 0,1 mm³ / N·m) et à l'écaillage par fracture (longueur de fissure > 0,05 mm) dans des conditions de travail difficiles (frottement élevé > 800 MPa, impact > 500 Hz, température élevée > 800° C) , entraînant la défaillance des outils aéronautiques (durée de vie < 10 heures), des forets miniers (forage < 1000 m) et des matrices (extrusion < 10⁶ fois). L'analyse du mécanisme de défaillance révèle la cause de la dégradation des performances grâce au modèle d'usure (formule d'Archard), à la mécanique de la rupture (facteur de concentration de contrainte $K_t > 1,5$) et à des techniques d'analyse avancées (telles que la microtomographie à rayons X), fournissant une base pour l'optimisation.

Cette section examine le mécanisme de défaillance sous trois aspects : la défaillance par usure (usure abrasive, usure adhésive), la fracture et l'écaillage (concentration de contraintes et microfissures) et l'influence de l'environnement (haute température, corrosion). Elle combine l'analyse microscopique (MEB , microtomographie à rayons X), le modèle mécanique (K_{IC} 10-14 MPa·m^{1/2}) et les cas.

7.3.1 Défaillance par usure du carbure cémenté (usure abrasive, usure adhésive)

Principe de défaillance par usure et aperçu technologique du carbure cémenté La défaillance par usure est la principale forme de défaillance du carbure cémenté, y compris l'usure abrasive (coupe de particules dures, taux d'usure ~ 0,1 mm³ / N · m) et l'usure

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

adhésive (transfert de matière, profondeur d'usure $> 5 \mu\text{m}$) . L'usure abrasive est courante dans l'exploitation minière (dureté de la roche $> 800 \text{HV}$), et l'usure adhésive est plus courante dans la coupe (température $> 600^\circ\text{C}$). Sur la base de la formule d'Archard ($V = k \cdot F \cdot S / H$), l'optimisation nécessite l'amélioration de la dureté ($\text{HV } 1500$) et de la qualité de surface ($R_a < 0,1 \mu\text{m}$) .

Les tests d'usure sont basés sur un flux de sable de 200-400 g/min et une charge de 100-150 N. Ces dernières années, la microtomographie à rayons X (résolution $< 1 \mu\text{m}$) est devenue un point chaud de recherche, qui peut reconstruire la morphologie des cicatrices d'usure en trois dimensions (largeur de rainure $< 10 \mu\text{m}$) .

Mécanisme de défaillance par usure et analyse du carbure cémenté

Usure abrasive

Les particules dures (SiO_2 , dureté $> 800 \text{HV}$) coupent le WC (profondeur $0,5\text{-}2 \mu\text{m}$) , formant des rainures (largeur $5\text{-}15 \mu\text{m}$) . Lorsque la dureté est $\text{HV } 1500$, le taux d'usure est $< 0,1 \text{mm}^3 / \text{N} \cdot \text{m}$; si la dureté est < 1200 , le taux d'usure augmente de 20 % à 30 %.

Usure adhésive

À haute température ($> 600^\circ\text{C}$), la phase Co se ramollit ($\text{HV} \sim 300$) et le matériau est transféré sur la surface de contact (épaisseur $2\text{-}5 \mu\text{m}$) . La granulométrie WC de $0,5 \mu\text{m}$ réduit l'adhérence (taux d'usure $< 0,12 \text{mm}^3 / \text{N} \cdot \text{m}$) .

Usure à haute température

À 800°C , le taux d'usure est $< 0,15 \text{mm}^3 / \text{N} \cdot \text{m}$ et une couche d'oxyde (WO_3 , épaisseur $\sim 2 \mu\text{m}$) se forme, réduisant l'usure de 5 à 10 %.

Corrosion et usure

Dans un environnement acide ($\text{pH} < 5$), le taux d'usure augmente de 15 à 20 %, la dissolution de la phase Co (taux $\sim 10^{-10} \text{g/cm}^2 \cdot \text{s}$) étant la principale raison.

La microtomographie à rayons X montre que l'usure abrasive est principalement rainurée, tandis que l'usure adhésive s'accompagne de piqûres de déchirure (diamètre d'environ $5 \text{ à } 10 \mu\text{m}$) . Par exemple, le taux d'usure du WC-10Co (grain de $0,5 \mu\text{m}$) est inférieur à $0,1 \text{mm}^3 / \text{N} \cdot \text{m}$, ce qui répond aux exigences de l'exploitation minière.

Analyse des facteurs affectant la défaillance par usure

du carbure cémenté La défaillance par usure est affectée par les facteurs suivants :

Dureté : Lorsque $\text{HV } 1500$, le taux d'usure est $< 0,1 \text{mm}^3 / \text{N} \cdot \text{m}$; si < 1200 , le taux d'usure augmente de 20 à 30 %.

Taille des grains : lorsqu'elle est de $0,5 \text{ à } 1 \mu\text{m}$, le taux d'usure est faible ; si elle est $> 2 \mu\text{m}$, le taux d'usure augmente de 15 à 20 %.

Teneur en Co : Lorsqu'elle est de 10 %, l'usure adhésive est moindre ; si elle est $> 15 \%$, le taux d'usure augmente de 10 à 15 %.

Rugosité de surface : lorsque $R_a < 0,1 \mu\text{m}$, le taux d'usure est faible ; si $> 0,2 \mu\text{m}$, le taux d'usure augmente de 20 à 25 %.

Température de fonctionnement : $> 600^\circ\text{C}$, l'usure de l'adhésif augmente de 40 à 50 %.

Taille des particules abrasives : Lorsque $< 50 \mu\text{m}$, le taux d'usure est $< 0,1 \text{mm}^3 / \text{N} \cdot \text{m}$; si > 100

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

μm , le taux d'usure augmente de 30 à 40 %.

Corrosion environnementale : lorsque le $\text{pH} < 5$, le taux d'usure augmente de 15 à 20 % ; si le $\text{pH} > 7$, le taux d'usure change de $< 5\%$.

réduire

le taux d'usure ($< 0,1 \text{ mm}^3 / \text{N} \cdot \text{m}$), les stratégies suivantes sont recommandées :

La granulométrie du WC est choisie entre 0,5 et $1 \mu\text{m}$ et la dureté est HV 1500.

La teneur en Co est de 10 % pour réduire l'usure de l'adhésif.

La surface est polie à $\text{Ra} < 0,1 \mu\text{m}$ et le taux d'usure est réduit de 15 à 20 %.

L'ajout de 0,2 à 0,5 % de VC peut augmenter la dureté de 3 à 5 %.

En utilisant un liquide de refroidissement (température $< 500^\circ\text{C}$), l'usure de l'adhésif est réduite de 20 à 30 %.

Le Cr_3C_2 (0,1 %-0,3 %) dans des conditions de température élevée forme une couche de Cr_2O_3 (épaisseur $\sim 1 \mu\text{m}$) et le taux d'usure diminue de 5 % à 10 %.

Protection du revêtement : L'application d'un revêtement CrN (épaisseur 2-4 μm , dureté HV 3000-3500) réduit le taux d'usure à $< 0,08 \text{ mm}^3 / \text{N} \cdot \text{m}$.

Pratique d'application de l'ingénierie des défaillances du carbure

Le carbure cimenté à faible usure fonctionne bien :

Foret minier : WC-10Co (taux d'usure $< 0,1 \text{ mm}^3 / \text{N} \cdot \text{m}$), distance de forage $> 1200 \text{ m}$, soit une augmentation de 40 %.

Outils aéronautiques : WC-8Co (dureté HV 1500), faible usure adhésive, durée de vie > 15 heures.

Filière résistante à l'usure : WC-12Co ($\text{Ra} < 0,1 \mu\text{m}$), taux d'usure $< 0,12 \text{ mm}^3 / \text{N} \cdot \text{m}$, temps d'extrusion $> 10^6$ fois.

Aubes de turbine d'aviation : WC-10Co (granulométrie $0,5 \mu\text{m}$, Revêtement CrN $3 \mu\text{m}$), en usure à haute température ($> 800^\circ\text{C}$), taux d'usure $< 0,08 \text{ mm}^3 / \text{N} \cdot \text{m}$, durée de vie $> 4\,000$ heures, soit une augmentation de 40 %.

7.3.2 Fracture et écaillage du carbure cimenté (concentration de contrainte et microfissures)

Présentation du principe et de la technologie

La fracture et l'écaillage sont initiés par la concentration de contrainte ($K_t > 1,5$) et les microfissures (longueur $> 0,05 \text{ mm}$), qui sont courantes dans les outils d'aviation (durée de vie de coupe < 10 heures) et les forets miniers (forage $< 1\,000 \text{ m}$). La fracture est basée sur la mécanique de la rupture ($K_{Ic} 10\text{-}14 \text{ MPa} \cdot \text{m}^{1/2}$), et l'écaillage implique une rupture d'interface (force de liaison $< 40 \text{ MPa}$). L'optimisation nécessite d'augmenter K_{Ic} et l'énergie d'interface ($< 1,5 \text{ J/m}^2$).

Analyse des défaillances Les fissures ont été détectées par MEB (résolution $< 0,2 \mu\text{m}$), tomographie (précision $\pm 0,02 \text{ mm}$) et technologie d'émission acoustique (gamme de fréquences 20 kHz-500 kHz). Par exemple, les outils WC-10Co avaient une durée de vie < 10 heures en raison de l'écaillage causé par les microfissures.

Mécanisme et analyse

Fracture : La concentration de contrainte (K_t est de 1,8 à 2,0) déclenche la croissance de la fissure

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

(vitesse de 10^{-2} m/s), et la fracture se produit lorsque $K_{Ic} < 10 \text{ MPa} \cdot \text{m}^{1/2}$ (longueur de la fissure $> 0,5 \text{ mm}$).

Écaillage : la contrainte interfaciale ($> 80 \text{ MPa}$) provoque la déchirure de la phase Co (profondeur $\sim 5\text{-}10 \mu\text{m}$) et la force de liaison est $< 40 \text{ MPa}$.

Trajectoire de fissure : fracture transgranulaire (rupture des grains WC, taille $0,5 \mu\text{m}$) et fracture intergranulaire (décollement des joints de grains, largeur $0,05\text{-}0,1 \mu\text{m}$) coexistent. Lorsque l'angle de déviation de la fissure est de 20° à 40° , le taux d'expansion diminue de 5 à 10 %.

Impact environnemental : Dans un environnement corrosif (concentration en NaCl 3,5%), le taux de croissance des fissures augmente de 20 à 25% et la corrosion sous contrainte (SCC) en est la principale cause.

³ fois à l'avance). Par exemple, le taux de fracture du WC-10Co ($K_{Ic} 12 \text{ MPa} \cdot \text{m}^{1/2}$) est $< 0,2 \%$, ce qui répond aux exigences de l'outil.

Analyse des facteurs d'influence

La fracture et l'écaillage sont affectés par les facteurs suivants :

K_{Ic} : Lorsque $K_{Ic} > 12 \text{ MPa} \cdot \text{m}^{1/2}$, le taux de fracture est $< 0,2 \%$; si $< 10 \text{ MPa} \cdot \text{m}^{1/2}$, le taux de fracture augmente de 40 % à 50 %.

Taille des grains : Lorsqu'elle est de $0,5$ à $1 \mu\text{m}$, la fissure se propage lentement ; si elle est $> 2 \mu\text{m}$, le taux de fracture augmente de 20 à 30 %.

Teneur en Co : Lorsqu'elle est de 10 %, le taux de pelage est moindre ; si elle est $< 6 \%$, le taux de pelage augmente de 15 à 20 %.

Défauts de surface : lorsque la longueur de la fissure est $> 0,05 \text{ mm}$, le taux de fracture augmente de 40 à 50 %.

Concentration de contrainte : lorsque $K_t > 2$, le taux d'écaillage augmente de 30 à 40 %.

Corrosion environnementale : lorsque la concentration en NaCl est $> 3,5 \%$, le taux de croissance des fissures augmente de 20 à 25 %.

Température : À $> 600^\circ\text{C}$, la contrainte thermique ($> 150 \text{ MPa}$) provoque une augmentation de 15 à 20 % du taux d'écaillage.

Stratégie d'optimisation

Pour réduire les fractures et l'écaillage ($< 0,2 \%$), les stratégies suivantes sont recommandées :

La teneur en Co est de 10 % et la taille des grains de WC est de $0,5$ à $1 \mu\text{m}$ pour que $K_{Ic} > 12 \text{ MPa} \cdot \text{m}^{1/2}$.

L'ajout de 0,2 à 0,5 % de VC peut augmenter la résistance des joints de grains de 5 à 10 %.

La surface est polie à $Ra < 0,1 \mu\text{m}$ et l'initiation des fissures est réduite de 20 à 25 %.

Concevez les coins arrondis (rayon $> 0,5 \text{ mm}$) de sorte que $K_t < 1,5$.

La tomographie (précision $\pm 0,02 \text{ mm}$) et l'émission acoustique (gamme de fréquences 20 kHz-500 kHz) ont été utilisées pour détecter les microfissures.

Protection contre la corrosion : L'application d'un revêtement Al_2O_3 (épaisseur $1\text{-}3 \mu\text{m}$, dureté HV 2500-3000) réduit l'impact de la corrosion sous contrainte et le taux de fracture est réduit à $< 0,1 \%$.

Pratique d'application d'ingénierie :

le carbure cimenté à faible taux de fracture fonctionne bien :

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

Outils aéronautiques : WC-10Co ($K_{1c} > 12 \text{ MPa} \cdot \text{m}^{1/2}$), taux de fracture $< 0,2 \%$, durée de vie > 15 heures.

Trépan minier : WC-8Co (taux de décavage $< 0,2 \%$), distance de forage $> 1\,200 \text{ m}$, soit une augmentation de 40% .

Moule résistant à l'usure : WC-12Co ($K_{1t} < 1,5$), temps d'extrusion $> 10^6$ fois, augmenté de 25% .

Foret PCB : WC-10Co (grain $0,5 \mu\text{m}$, revêtement Al_2O_3 $2 \mu\text{m}$), en perçage à haute contrainte ($> 10^4$ trous), le taux de fracture est $< 0,1\%$ et la durée de vie est $> 10^5$ trous, ce qui est amélioré de 80% .

7.4. Stratégies d'amélioration des performances du carbure cimenté

7.4.1 Stratégie d'amélioration des performances du carbure cimenté - Affinage du grain du carbure cimenté

Aperçu du principe et de la technologie d'affinage des grains de carbure cimenté

L'affinage des grains du carbure cimenté (WC-Co) est une technologie d'optimisation microstructurale qui contrôle précisément la taille des grains du carbure de tungstène (WC) à moins de $0,5 \mu\text{m}$. Ce procédé améliore considérablement la dureté et la résistance du matériau, posant ainsi une base solide pour l'application du carbure cimenté dans des conditions de travail difficiles. L'affinage des grains repose sur l'effet Hall-Petch ($\sigma_y = \sigma_0 + k \cdot d^{-1/2}$, $\sigma_y = \sigma_0 + k \cdot d^{-1/2}$), qui indique qu'à mesure que la taille des grains diminue, la densité des joints de grains augmente significativement (jusqu'à $> 10^{13} \text{ m}^{-2}$), améliorant ainsi la résistance du matériau à la déformation plastique et à la propagation des fissures. Cette technologie de raffinement est capable d'augmenter la dureté à HV $1600-1800$ et la résistance à plus de 4500 MPa , ce qui permet au carbure cimenté d'exceller dans les outils à haute résistance et les composants résistants à l'usure.

Le processus principal pour obtenir un affinage du grain comprend un broyage à billes à haute énergie pendant 20 à 40 heures, utilisant des supports de broyage rotatifs à grande vitesse (tels que des billes de carbure de tungstène) pour broyer mécaniquement et mélanger uniformément les matières premières, suivi d'un frittage sous vide (plage de température de 1400 à 1500°C , degré de vide strictement contrôlé à $< 10^{-2} \text{ Pa}$) pour assurer la stabilité de la granulométrie et éviter une croissance excessive. Ces dernières années, les progrès technologiques ont favorisé l'introduction d'additifs multicomposants (tels que VC+TaC+ZrC) pour optimiser davantage l'effet d'affinage du grain. Ces additifs sont ajoutés à un faible rapport de $0,1\%$ à $0,3\%$, ce qui peut maintenir la taille des grains dans la plage ultra-fine de $0,2$ à $0,5 \mu\text{m}$, poussant ainsi la dureté à HV $1800-2000$, tout en augmentant la ténacité à la rupture (K_{1c}) à $13 \text{ MPa} \cdot \text{m}^{1/2}$, offrant plus de possibilités pour les applications haut de gamme.

Mécanisme et analyse de l'affinage des grains de carbure cimenté

L'affinage des grains améliore considérablement les propriétés mécaniques du carbure cimenté en réduisant la taille des grains de WC ($< 0,5 \mu\text{m}$). Le mécanisme peut être analysé en profondeur à

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

l'échelle microscopique :

Renforcement des joints de grains

Lorsque la taille des grains de WC est réduite à $< 0,5 \mu\text{m}$, la densité des joints de grains augmente considérablement ($> 10^{13} \text{m}^{-2}$). Selon l'effet Hall-Petch, la dureté du matériau augmente de 25 à 30 % (atteignant HV 1600-1800) et la résistance augmente d'environ 20 à 25 %. Ce réseau de joints de grains à haute densité empêche efficacement le mouvement des dislocations et améliore la capacité du matériau à résister à la déformation.

Amélioration d'Orowan

Lorsque l'espacement inter-grains λ est réduit à $< 0,5 \mu\text{m}$, le facteur de renforcement $\tau \sim Gb/\lambda$ (où G est le module de cisaillement et b le vecteur de Burgers) augmente significativement, et les dislocations sont « bloquées » aux joints de grains, améliorant encore la capacité antidérapante. Ce mécanisme est particulièrement important dans les grains fins.

Uniformité microscopique

Les grains fins sont répartis uniformément, ce qui réduit les points de concentration de contraintes locales, améliore l'équilibre entre dureté et ténacité et rend le matériau moins sujet à la rupture fragile sous forte contrainte.

Prenons l'exemple de l'alliage WC-10Co : en affinant la granulométrie à $< 0,5 \mu\text{m}$, la dureté peut atteindre HV 1700 et la ténacité à la rupture K_{IC} est d'environ $12-13 \text{MPa}\cdot\text{m}^{1/2}$. Cette combinaison de propriétés le rend particulièrement adapté aux outils à haute résistance tels que les forets miniers et les outils de coupe pour l'aviation.

Analyse des facteurs d'influence

L'effet du raffinement du grain est affecté par une combinaison de paramètres de processus et de composition du matériau, notamment :

Taille des grains

Lorsque la taille des grains est contrôlée à $< 0,5 \mu\text{m}$, la dureté peut dépasser 1 600 HV ; cependant, si la taille des grains dépasse $1 \mu\text{m}$, la densité des joints de grains diminue, la dureté tombe à $< 1 500 \text{HV}$ et l'avantage de performance est progressivement perdu.

Temps de broyage à boulets

Le broyage à boulets à haute énergie pendant 20 à 40 heures peut affiner efficacement la taille des grains à $< 0,5 \mu\text{m}$; si le temps de broyage à boulets est inférieur à 15 heures, la taille des grains peut dépasser $1 \mu\text{m}$, ce qui entraîne un effet de raffinement insatisfaisant.

Température de frittage

La plage de température de 1400 à 1500 °C peut maintenir les grains stables et éviter une croissance excessive ; si la température dépasse 1550 °C, les grains peuvent croître jusqu'à $> 1 \mu\text{m}$ et les performances diminueront.

Contenu Co

Lorsque la teneur en Co est de 10 %, la ténacité à la rupture K_{IC} peut atteindre $> 12 \text{MPa}\cdot\text{m}^{1/2}$,

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

fournissant un tampon plastique suffisant ; si la teneur en Co est inférieure à 6 %, la ténacité diminue considérablement ($K_{Ic} < 10 \text{ MPa} \cdot \text{m}^{1/2}$), limitant la plage d'application du matériau.

Stratégie d'optimisation

Pour atteindre les objectifs de haute performance (dureté HV 1700, ténacité à la rupture $K_{Ic} > 12 \text{ MPa} \cdot \text{m}^{1/2}$), les stratégies d'optimisation suivantes sont recommandées :

La granulométrie $WC < 0,5 \mu\text{m}$ a été sélectionnée et obtenue par broyage à billes à haute énergie pendant 20 à 40 heures pour garantir que les matières premières soient entièrement broyées et mélangées uniformément.

La température de frittage est strictement contrôlée à 1400-1500°C et le vide est maintenu à $< 10^{-2} \text{ Pa}$ pour éviter la croissance des grains et la réaction d'oxydation.

La teneur en Co est maintenue à 10 % et l'équilibre entre ténacité et dureté est optimisé en ajustant le rapport.

en utilisant un granulomètre laser (écart de mesure $< 0,02 \mu\text{m}$) pour assurer une distribution uniforme et éviter que des grains locaux surdimensionnés n'affectent les performances.

Pratique d'application de l'ingénierie

Le carbure cémenté à grains raffinés présente d'excellentes performances dans une variété d'applications d'ingénierie :

Trépan de forage minier

Le WC-10Co (granulométrie $< 0,5 \mu\text{m}$), avec une dureté de HV 1700, peut considérablement étendre la distance de forage à $> 1500 \text{ m}$, soit une augmentation de 50 % par rapport aux procédés traditionnels, améliorant ainsi efficacement l'efficacité de l'exploitation minière.

Outils d'aviation

WC-8Co (granulométrie $< 0,5 \mu\text{m}$), grâce au raffinement du grain, la durée de vie est prolongée à > 15 heures, soit une augmentation de 25 %, répondant aux besoins de découpe de haute précision.

Moule résistant à l'usure

WC-12Co (granulométrie $< 0,5 \mu\text{m}$), temps d'extrusion supérieurs à 10^6 fois, amélioration des performances de 25 %, adapté aux opérations d'emboutissage à haute fréquence.

7.4.2 Stratégies d'amélioration des performances du carbure cémenté, additifs pour carbure cémenté (VC, TaC)

Principe et aperçu technique

Les performances du carbure cémenté sont améliorées par l'introduction d'additifs (tels que VC, TaC) afin d'optimiser la microstructure, d'améliorer significativement la résistance aux joints de grains et d'inhiber la croissance des grains de WC, améliorant ainsi les performances globales du matériau. La quantité d'ajout de VC et de TaC est généralement contrôlée entre 0,2 % et 0,5 %. Grâce au renforcement de la solution solide et à la modification des joints de grains, la dureté est portée à HV 1600-1800 et la ténacité à la rupture (K_{Ic}) à $10-14 \text{ MPa} \cdot \text{m}^{1/2}$. Le procédé comprend un broyage à billes à haute énergie pour mélanger uniformément les additifs aux matières premières, puis les solidifier dans un environnement de frittage sous vide à 1400-1500 °C. Ces dernières années,

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

le développement de multi-additifs (tels que VC+TaC+ ZrC , avec un ratio de 0,1 % à 0,3 %) est devenu un pôle de recherche majeur. L'effet synergique de ces additifs pousse la dureté à HV 1800-2000 et K_{IC} à $13 \text{ MPa} \cdot \text{m}^{1/2}$, offrant de nouvelles possibilités d'application du carbure cimenté dans des conditions de travail extrêmes.

Mécanisme et analyse

Les additifs améliorent les performances du carbure cimenté grâce aux mécanismes spécifiques suivants :

VC Ajouter

L'ajout de 0,2 à 0,5 % de VC formera une phase VCx (épaisseur < 20 nm) à la limite des grains, ce qui peut augmenter la dureté d'environ 10 à 15 % en inhibant la croissance des grains de WC (taux de croissance < 10^{-10} m/s) tout en maintenant la stabilité de la microstructure.

Ajout de TaC

L'ajout de 0,2 à 0,5 % de TaC améliore considérablement la résistance aux joints de grains (> 150 MPa) et augmente la ténacité à la rupture K_{IC} de 5 à 10 % grâce au renforcement de la solution solide, améliorant ainsi efficacement la résistance du matériau à la croissance des fissures.

Multi-additifs

VC+TaC+ZrC (rapport total 0,1%-0,3%) peut atteindre une augmentation supplémentaire de 3% à 5% de la dureté grâce au renforcement de la solution solide avec un espacement des joints de grains de < $0,2 \mu \text{m}$, et K_{IC} atteint $13 \text{ MPa} \cdot \text{m}^{1/2}$, réalisant une double optimisation de la dureté et de la ténacité.

Modèle mécanique

Combiné avec le renforcement d'Orowan ($\tau \sim Gb / \lambda$) et le renforcement des joints de grains, le mouvement des dislocations est efficacement entravé et la résistance à la déformation est considérablement améliorée. Par exemple, après ajout de 0,3 % de VC+TaC, la dureté de l'alliage WC-10Co atteint HV 1700 et K_{IC} est de $13 \text{ MPa} \cdot \text{m}^{1/2}$, ce qui répond aux exigences des forets hautes performances.

Analyse des facteurs d'influence

L'impact des additifs sur l'amélioration des performances est limité par de nombreux facteurs :

Contenu additif

Le VC et le TaC sont de 0,2% à 0,5% et les performances sont optimales dans cette plage ; s'il dépasse 0,8%, le rapport de phase fragile peut dépasser 0,5%, ce qui entraîne une diminution de la ténacité.

Rapport multi-additifs

VC:TaC :ZrC = 1:1:1, l'augmentation de la dureté est la plus importante (> 1800) ; si le rapport est déséquilibré (par exemple 1:2:1), le rapport de phase cassante peut dépasser 1 %, affectant la stabilité du matériau.

Temps de broyage à boulets

20 à 40 heures de broyage à boulets garantissent une répartition uniforme des additifs ; si moins de 15 heures sont nécessaires, les additifs sont dispersés de manière inégale et l'effet est limité.

Température de frittage

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

1400-1500°C maintient la stabilité chimique et l'effet de renforcement des joints de grains de l'additif ; s'il dépasse 1550°C, l'additif peut se volatiliser ou avoir des réactions secondaires, entraînant une dégradation des performances.

Stratégie d'optimisation

Pour atteindre les objectifs de haute performance (dureté HV 1700, ténacité à la rupture K_{IC} 13 MPa·m^{1/2}), les stratégies d'optimisation suivantes sont recommandées :

L'ajout de VC/ TaC / ZrC (rapport total 0,1%-0,3%, rapport 1:1:1) peut augmenter la dureté de 3% à 5% grâce au renforcement de la solution solide.

Le broyage à boulets à haute énergie dure de 20 à 40 heures pour garantir que les additifs et les matières premières sont entièrement mélangés et uniformément répartis.

La température de frittage est contrôlée à 1400-1500°C et le degré de vide est $<10^{-2}$ Pa pour éviter la volatilisation des additifs.

La microscopie électronique à transmission (MET, résolution $<0,1$ nm) a été utilisée pour vérifier l'effet de modification des joints de grains et assurer la distribution microscopique des additifs.

Pratique d'application de l'ingénierie

Les carbures cémentés optimisés par additifs excellent dans les applications d'ingénierie :

Trépan de forage minier

WC-10Co (VC + TaC 0,3%), avec une dureté de HV 1700, peut étendre la distance de forage à >1500 m, soit une augmentation de 50 %, améliorant considérablement l'efficacité minière.

Outils d'aviation

WC-8Co (TaC 0,3%), durée de vie prolongée à >15 heures, soit une augmentation de 25%, pour répondre aux besoins de coupe de haute précision.

Électrolyseur à nouvelle énergie

WC-10Co (VC +TaC+ZrC 0,2%), avec une dureté supérieure à 1800, a une durée de vie de $>10^3$ heures sous choc électrochimique ($>10^3$ fois), soit une augmentation de 40%.

7.4.3 Stratégies pour améliorer les performances du carbure cémenté et renforcer la surface du carbure cémenté

Aperçu des principes et des technologies de renforcement de surface en carbure cémenté

Améliore considérablement la dureté de surface et la résistance à l'usure grâce à des méthodes telles que la cémentation, l'implantation ionique et le placage laser , ce qui garantit l'utilisation à long terme du carbure cémenté dans des environnements à forte usure et à charges dynamiques. Le processus de cémentation forme une couche riche en WC (épaisseur 10-30 μ m , dureté >2000) dans une atmosphère de CH₄ à 850-950 °C, l'implantation ionique introduit une contrainte de compression résiduelle (>400 MPa) par l'intermédiaire d'ions N⁺ (dose 10^{16} - 10^{17} cm⁻² , énergie 80-120 keV), et le placage laser utilise 1,5-2,5 kW de puissance laser pour générer une couche de dureté élevée (épaisseur 50-100 μ m , dureté >2500). Ensemble, ces technologies réduisent le taux d'usure à $<0,08$ mm³ / N · m . Ces dernières années, l'implantation ionique assistée par plasma (PIII, dose 10^{17} - 10^{18} cm⁻²) est devenue un pôle de recherche majeur. Son effet de renforcement en

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

profondeur peut atteindre $> 0,5 \mu\text{m}$, améliorant considérablement la durabilité de la surface.

Mécanisme et analyse du renforcement de surface du carbure cémenté

Le mécanisme spécifique de renforcement de surface est le suivant :

carburation

Les atomes de carbone se diffusent (taux de diffusion $\sim 10^{-11} \text{ cm}^2/\text{s}$) pour former une couche riche en WC (épaisseur $10\text{-}30 \mu\text{m}$) sur la surface avec une dureté supérieure à 2000 HV. Le taux d'usure est réduit à $< 0,08 \text{ mm}^3/\text{N} \cdot \text{m}$, améliorant efficacement la résistance à l'usure de la surface.

Implantation ionique

La profondeur d'implantation des ions N^+ est de $0,1$ à $0,3 \mu\text{m}$, formant une structure renforcée par une solution solide avec une contrainte de compression résiduelle $> 400 \text{ MPa}$, augmentant la ténacité à la rupture K_{Ic} de 5 à 10 % et améliorant la résistance à la croissance des fissures de surface.

Revêtement laser

En faisant fondre le matériau de surface avec une puissance laser de $1,5$ à $2,5 \text{ kW}$, une couche de dureté élevée (dureté > 2500) d'une épaisseur de 50 à $100 \mu\text{m}$ est formée, réduisant ainsi le taux d'usure à $< 0,07 \text{ mm}^3/\text{N} \cdot \text{m}$, tout en améliorant la résistance à la fatigue. Par exemple, la dureté de l'alliage WC-10Co atteint HV 2000 et le taux d'usure est $< 0,08 \text{ mm}^3/\text{N} \cdot \text{m}$ sous une couche carburée de $20 \mu\text{m}$, ce qui répond pleinement aux exigences de haute performance des outils aéronautiques.

Analyse des facteurs affectant le renforcement de la surface du carbure cémenté

L'effet de renforcement de surface est affecté par divers paramètres de processus et propriétés du matériau :

Température de cémentation

À $850\text{-}950^\circ\text{C}$, l'épaisseur de la couche de carbone est stable à $10\text{-}30 \mu\text{m}$; si la température dépasse 1000°C , la couche de carbone peut être trop épaisse ($> 50 \mu\text{m}$), ce qui entraîne un risque accru d'écaillage.

Dose d'implantation ionique

10^{16} et 10^{17} cm^{-2} , la contrainte résiduelle est $> 400 \text{ MPa}$. Si la dose dépasse 10^{18} cm^{-2} , le taux d'endommagement de surface peut atteindre $> 5\%$, ce qui affecte la durée de vie.

Puissance laser

À $1,5\text{-}2,5 \text{ kW}$, la couche de revêtement est uniforme et dense; si la puissance dépasse 3 kW , la contrainte thermique peut dépasser 200 MPa , provoquant des microfissures.

Taille des grains

la granulométrie est $< 0,5 \mu\text{m}$, l'effet de renforcement de surface est le meilleur; si elle est $> 2 \mu\text{m}$, l'augmentation de la dureté est inférieure à 10 % et l'efficacité de renforcement est réduite.

Rugosité de surface

$R_a < 0,1 \mu\text{m}$, la couche de renforcement est étroitement liée au substrat; si $> 0,2 \mu\text{m}$, le taux d'usure peut augmenter de 15 à 20 %.

Stratégie d'optimisation pour le renforcement de surface en carbure cémenté

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

Pour atteindre les objectifs de dureté et de résistance à l'usure élevés (dureté HV 2000, taux d'usure $< 0,08 \text{ mm}^3 / \text{N} \cdot \text{m}$), les stratégies d'optimisation suivantes sont recommandées :

La température de cémentation est contrôlée à 850-950°C et l'épaisseur de la couche de carbone est maintenue avec précision à 10-30 μm pour assurer un durcissement de surface uniforme.

La dose d'implantation ionique a été fixée à $10^{16} - 10^{17} \text{ cm}^{-2}$ et l'énergie à 80-120 keV pour générer une contrainte de compression résiduelle stable.

La puissance de revêtement laser a été ajustée à 1,5-2,5 kW et l'épaisseur de la couche de revêtement a été contrôlée à 50-100 μm .

Sélectionnez du WC avec une granulométrie $< 0,5 \mu\text{m}$ et polissez la surface à $R_a < 0,1 \mu\text{m}$ pour réduire les sources d'usure.

en utilisant une analyse par diffraction des rayons X (résolution $< 1 \mu\text{m}$) pour garantir une distribution de contrainte et une épaisseur cohérentes.

Pratique de l'application technique du renforcement de surface du carbure cémenté

Le carbure cémenté durci en surface est performant dans les applications d'ingénierie :

Outils d'aviation

WC-10Co (couche carburée 20 μm), la dureté atteint HV 2000, la durée de vie est prolongée à > 15 heures, soit une augmentation de 25 %, répondant aux besoins de découpe de haute précision.

Trépan de forage minier

WC-8Co (ion implanté $\text{N}^+ 10^{17} \text{ cm}^{-2}$), taux d'usure $< 0,08 \text{ mm}^3 / \text{N} \cdot \text{m}$, distance de forage supérieure à 1 500 m, soit une augmentation de 50 %, améliorant considérablement l'efficacité minière.

Moule résistant à l'usure

WC-12Co (couche de revêtement laser 80 μm), dureté > 2500 , temps d'extrusion supérieurs à 10^6 fois, soit une augmentation de 25 %, adapté aux opérations d'emboutissage haute fréquence.

7.4.4 Stratégie d'amélioration des performances du carbure cémenté - Technologie de fabrication avancée du carbure cémenté (impression 3D)

Principe et aperçu technique de la technologie de fabrication avancée du carbure cémenté

et le procédé de fusion sélective par laser (SLM) ou de moulage par jet de liant est utilisé pour contrôler précisément la distribution du matériau afin d'optimiser la dureté (HV 1500-1800), la ténacité ($K_{Ic} 10-14 \text{ MPa} \cdot \text{m}^{1/2}$) et la résistance à la fatigue ($> 10^5$ fois). Le procédé SLM utilise une puissance laser de 200 à 300 W et une épaisseur de couche de 20 à 50 μm . La technologie de moulage par jet de liant permet une impression haute résolution ($< 50 \mu\text{m}$) grâce au jet de liant. Ces dernières années, la technologie d'impression 3D nano (épaisseur de couche $< 10 \mu\text{m}$) est devenue un point chaud de pointe, capable de fabriquer des structures à gradient de haute précision, avec une dureté augmentée à > 1800 et un K_{Ic} dépassant $13 \text{ MPa} \cdot \text{m}^{1/2}$, ouvrant une nouvelle voie pour la conception de composants complexes.

Mécanisme et analyse de la technologie de fabrication avancée du carbure cémenté

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

Les mécanismes par lesquels l'impression 3D améliore les performances comprennent :

Structure du gradient

En ajustant la répartition du matériau, une dureté élevée est obtenue sur la surface ($HV > 1800$) tandis qu'une ténacité élevée est maintenue à l'intérieur ($K_{Ic} > 13 \text{ MPa} \cdot \text{m}^{1/2}$), réduisant efficacement la concentration de contraintes et améliorant la fiabilité globale.

Micro-contrôle

L'épaisseur de la couche $< 50 \mu\text{m}$ garantit une densité $> 99\%$, la porosité est réduite à $< 0,5\%$ et la résistance du matériau à la croissance des fissures est améliorée.

Effet du traitement thermique

La température de post-traitement de 800 à 1000°C élimine les contraintes résiduelles ($< 100 \text{ MPa}$), améliorant ainsi la résistance à la fatigue et la stabilité structurelle.

Par exemple, l'alliage WC-10Co préparé par SLM présente une dureté de $HV 1700$, un $K_{Ic} 12 \text{ MPa} \cdot \text{m}^{1/2}$ et une durée de vie en fatigue supérieure à 10^5 fois supérieure, affichant d'excellentes performances globales.

Analyse des facteurs affectant la technologie de fabrication avancée du carbure cémenté

Les résultats de l'impression 3D sont affectés par une variété de paramètres de processus :

Puissance laser

À $200\text{-}300 \text{ W}$, le bain de fusion se forme de manière stable et les matériaux fusionnent uniformément ; s'il dépasse 350 W , la contrainte thermique peut atteindre $> 150 \text{ MPa}$, affectant la qualité des pièces.

Épaisseur de la couche

$20\text{-}50 \mu\text{m}$, la densité est $> 99\%$; si l'épaisseur de la couche dépasse $100 \mu\text{m}$, la porosité peut atteindre $> 1\%$, réduisant ainsi les performances.

Vitesse d'impression

10 à 20 mm/s assurent la force de liaison intercouche ; si la vitesse dépasse 30 mm/s , la force de liaison intercouche diminue, affectant la résistance globale.

Température de post-traitement

$800\text{-}1000^\circ\text{C}$ optimise la microstructure ; si elle dépasse 1100°C , les grains peuvent grossir et les performances peuvent se dégrader.

Stratégie d'optimisation de la technologie de fabrication avancée du carbure cémenté

Pour atteindre les objectifs de haute performance (dureté $HV 1700$, ténacité à la rupture $K_{Ic} > 12 \text{ MPa} \cdot \text{m}^{1/2}$), les stratégies d'optimisation suivantes sont recommandées :

La puissance du laser a été contrôlée à $200\text{-}300 \text{ W}$ et l'épaisseur de la couche a été fixée à $20\text{-}50 \mu\text{m}$ pour assurer la stabilité et la densité du bain de fusion.

La vitesse d'impression a été maintenue à $10\text{-}20 \text{ mm/s}$ et la température de post-traitement était de $800\text{-}1000^\circ\text{C}$ pour éliminer les contraintes résiduelles.

Optimisez la teneur en Co à 10% pour améliorer l'équilibre entre ténacité et dureté.

Utilisez la tomographie (CT, résolution $< 10 \mu\text{m}$) pour détecter les défauts internes et garantir la qualité d'impression.

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

Pratique d'application technique de la technologie de fabrication avancée du carbure cimenté

Le carbure imprimé en 3D excelle dans les applications d'ingénierie :

Outils d'aviation

WC-8Co (procédé SLM), dureté HV 1700, durée de vie prolongée à >15 heures, soit une augmentation de 25%, pour répondre aux besoins de traitement de haute précision.

Moule résistant à l'usure

WC-12Co (procédé de jet de liant), les temps d'extrusion dépassent 10^6 fois, soit une augmentation de 25 %, adapté aux moules de formes complexes.

Pièces complexes

WC-10Co (nano impression 3D), ténacité à la rupture $K_{Ic} > 13 \text{ MPa} \cdot \text{m}^{1/2}$, durée de vie en fatigue $> 10^5$ fois, soit une augmentation de 30 %, adapté aux composants hautes performances personnalisés.

7.5 Tendances de développement futures : application de l'IA et de l'IIoT à l'optimisation des performances du carbure cimenté

L'intelligence artificielle (IA) et l'Internet industriel des objets (IIoT) ont révolutionné l'optimisation des performances et les applications industrielles du carbure cimenté (WC-Co). Grâce aux capacités de modélisation pilotées par les données de l'IA et aux capacités de perception et de contrôle en temps réel de l'IIoT, le carbure cimenté a réalisé des améliorations intelligentes dans la conception des microstructures, la surveillance des performances, la prévision des pannes et l'optimisation des procédés. Ce qui suit présente de manière systématique les perspectives d'application de l'IA et de l'IIoT dans l'optimisation des performances du carbure cimenté sous quatre angles : optimisation des microstructures, surveillance des performances en temps réel, prévision des pannes et maintenance intelligente, optimisation des procédés et fabrication intelligente, en s'appuyant sur les dernières recherches et données.

7.5.1 Optimisation de la microstructure : conception de précision pilotée par l'IA

La technologie de l'IA, grâce à des algorithmes tels que l'apprentissage automatique (ML), l'apprentissage profond (DL) et l'apprentissage par renforcement (RL), combinés à l'analyse des mégadonnées, peut prédire avec précision la relation complexe entre les paramètres de la microstructure du carbure cimenté (tels que la taille des grains, la teneur en Co, le rapport additif) et les performances (dureté, ténacité), permettant ainsi une conception optimale de la microstructure.

Optimisation de la granulométrie

Les algorithmes d'IA tels que les machines à vecteurs de support (SVM) et les réseaux neuronaux profonds (DNN) peuvent prédire l'effet de la taille des grains sur la dureté en fonction des données de processus historiques (par exemple, le temps de broyage à boulets, la température de frittage), avec une précision de prédiction de 92 % à 96 % (Institut Fraunhofer, Allemagne, 2024).

En 2024, l'Institut Fraunhofer en Allemagne a développé un système d'optimisation des grains par

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

IA basé sur des jumeaux numériques. En simulant la microstructure du WC-Co (méthode de Monte Carlo), l'écart granulométrique a été contrôlé à $\pm 0,01 \mu m$ et la consistance de la dureté a été améliorée de 12 à 15 % (HV 1650-1800). Par exemple, lorsque la granulométrie a été optimisée de $0,5 \mu m$ à $0,3 \mu m$, la dureté a augmenté de 10 % (HV 1700 à 1870) et la ténacité (K_{Ic}) a été maintenue à $12-13 MPa \cdot m^{1/2}$ (dureté Vickers et essai par poutre entaillée à un seul bord).

Optimisation du contenu et de la distribution du Co

En 2024, le Massachusetts Institute of Technology (MIT) a développé un système d'optimisation de la teneur en Co assisté par l'IA, qui combinait l'optimisation bayésienne et la simulation de Monte Carlo pour contrôler l'écart de distribution du Co à $< 0,1 \%$ (analyse par spectroscopie de fluorescence X) et a amélioré la cohérence des performances de 15 à 18 %.

Français Grâce à l'apprentissage par renforcement (RL), l'IA ajuste dynamiquement la teneur en Co (6%-10%), contrôle l'écart de ténacité à la rupture (K_{Ic}) à $< 0,4 MPa \cdot m^{1/2}$ et améliore la cohérence de la ténacité (K_{Ic} 20%, plage de test $12-14 MPa \cdot m^{1/2}$). Après optimisation, la dureté du carbure cémenté WC-10Co est stabilisée à HV 1680-1750 et la ténacité est améliorée de 10% (K_{Ic} de 12,5 à $13,8 MPa \cdot m^{1/2}$).

Optimisation du rapport additif

L'effet du rapport des additifs (tels que VC, TaC) sur les performances grâce à l'algorithme de l'arbre de boosting de gradient (GBDT), optimise l'ajout de VC (0,2%-0,4%) avec une précision de 95% et augmente la dureté de 5%-8% (HV 1750-1850). En 2025, une étude de l'Université d'Uppsala en Suède a montré qu'après que l'IA ait optimisé le rapport VC+TaC (1:1, ajout total de 0,3%), le taux de croissance des grains a diminué de 6% ($< 10^{-9} m/s$, mesure TEM) et la dureté a atteint HV 1900-1950.

7.5.2 Surveillance des performances en temps réel : perception de haute précision de l'IIoT

L'IIoT permet la surveillance en temps réel des paramètres de performance du carbure cémenté grâce à des capteurs intégrés, à l'informatique de pointe et aux réseaux 5G, garantissant la stabilité du processus et la cohérence des performances.

Surveillance des paramètres clés

Taille des grains

L'analyseur de taille de nanoparticules laser (précision $\pm 0,005 \mu m$) surveille le changement de taille des grains en temps réel et l'écart est contrôlé à $< 0,01 \mu m$ (Université RWTH d'Aix-la-Chapelle, Allemagne, 2024).

Contenu Co

Un capteur de méta-analyse à rayons X (précision $\pm 0,05\%$) surveille le taux de diffusion du Co ($< 10^{-10} cm^2/s$) et assure l'homogénéité de la distribution (écart $< 0,3\%$).

Répartition des contraintes

Les capteurs de contrainte (précision $\pm 0,5 MPa$) surveillent les variations de contrainte thermique avec un écart ΔK_{Ic} de $< 0,4 MPa \cdot m^{1/2}$ et une fluctuation de dureté de $\leq \pm 1,8 \%$ (HV 1650-1680).

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

Ajustement dynamique du processus

L'IIoT transmet des données en temps réel à la plateforme cloud via le réseau 5G (délai < 5 ms) et, associé à des algorithmes d'IA, ajuste dynamiquement le temps de broyage à billes (écart $\pm 0,3$ heure) et la température de frittage (écart ± 3 °C). Par exemple, l'écart granulométrique est réduit de $0,05$ μm à $0,02$ μm , et la constance des performances est améliorée de 15% (écart de dureté $< 0,5\%$).

Surveillance de l'amélioration de la surface

de revêtement laser, L'IIoT utilise des capteurs de température infrarouges (précision $\pm 1,5$ °C) pour surveiller les variations de contrainte thermique (écart < 8 MPa) et optimiser la qualité de la couche de revêtement. En 2024, l'Université RWTH d'Aix-la-Chapelle (Allemagne) a développé une solution combinant IA et IIoT. Le système de revêtement laser ajuste la puissance du laser ($1,5$ - $2,5$ kW) en temps réel pour augmenter la dureté de la couche de revêtement à HV 2600-2700, avec un écart d'épaisseur de < 5 μm (mesure SEM).

7.5.3 Prévision des pannes et maintenance intelligente : application collaborative de l'IA et de l'IIoT

L'IA et l'IIoT améliorent considérablement la prédiction des pannes et les capacités de maintenance intelligente du carbure cémenté, prolongeant ainsi sa durée de vie et réduisant le taux de panne.

Prévision de la croissance des fissures et de la défaillance par fatigue

L'IA utilise des réseaux neuronaux récurrents (RNN) pour prédire le taux de croissance des fissures (da/dN) avec une précision de $> 92\%$ (Université de Tokyo, Japon, 2024).

L'IIoT est équipé de capteurs d'émission acoustique (précision de fréquence $\pm 1,5$ kHz) pour surveiller les signaux d'initiation de fissures en temps réel (avance $> 10^3$ fois) via le réseau 5G.

En 2024, l'Université de Tokyo au Japon a développé un système de prédiction de la durée de vie en fatigue basé sur l'IA qui prédit le taux de croissance des fissures (précision $\pm 10^{-10}$ mm/cycle), augmentant la durée de vie des forêts miniers de 15 à 20% (de $1\,500$ m à $1\,800$ m de distance de forage).

Le taux d'échec a été réduit de $0,15\%$ à $< 0,08\%$ (données de test sur le terrain).

Prédiction de la résistance aux chocs

En 2024, l'Université de Lund en Suède a développé un système de prédiction d'IA combinant l'analyse par éléments finis (FEA) et les réseaux neuronaux (NN) pour prédire la ténacité aux chocs (K_{Ic}) avec une précision de $\pm 0,2$ $\text{MPa}\cdot\text{m}^{1/2}$. Après optimisation, la résistance aux chocs des forêts miniers a augmenté de 22% (K_{Ic} de $12,0$ à $14,6$ $\text{MPa}\cdot\text{m}^{1/2}$) et la durée de vie a été prolongée de 20 à 25% (test sur le terrain).

Prédiction des défaillances dues à l'usure

Améliore la résistance à l'usure des forêts miniers de 20 à 25% grâce à la surveillance en temps réel de la morphologie des cicatrices d'usure (précision de prédiction de la largeur des rainures $\pm 0,4$ μm ,

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

mesurée au microscope). Le taux d'usure est réduit de $0,1 \text{ mm}^3/\text{N}\cdot\text{m}$ à $0,075 \text{ mm}^3/\text{N}\cdot\text{m}$ (test ASTM G65).

Détection des fissures et prédiction du temps de défaillance

En 2024, l'Université de Cambridge, au Royaume-Uni, a développé un système de détection de fissures par IA combinant les données d'émission acoustique (EA) et de tomodensitométrie (résolution $< 5 \mu\text{m}$) pour améliorer la précision de la prédiction des défaillances à $\pm 0,8$ heure. Le délai de prédiction est passé de 10^{-3} à 10^{-4} fois, réduisant ainsi le taux d'arrêts imprévus de 30 % (données d'application industrielle).

7.5.4 Optimisation des processus et fabrication intelligente : collaboration efficace entre IA et IIoT

L'IA et l'IIoT dans la fabrication de carbure cimenté ont considérablement amélioré l'efficacité des processus, la stabilité des performances et l'intelligence de la production.

Optimisation du rapport additif

L'IA utilise des algorithmes génétiques (GA) pour optimiser le rapport des additifs VC/ TaC / ZrC (ajout total 0,1%-0,3%) avec une erreur de $< 0,04\%$ et un écart de consistance de dureté de $< 1,5\%$ (Université nationale de Séoul, Corée du Sud, 2024). En 2024, l'Université nationale de Séoul en Corée du Sud a développé un système d'optimisation des additifs par IA qui augmente la dureté à HV 1900-2000 et maintient la ténacité à $K_{IC} 12-13 \text{ MPa}\cdot\text{m}^{1/2}$ par surveillance en temps réel du taux de croissance des grains ($< 10^{-10} \text{ m/s}$, mesure TEM) .

Optimisation des paramètres du processus

L'IIoT utilise des capteurs (précision granulométrique de $\pm 0,004 \mu\text{m}$) pour surveiller le processus de broyage à boulets et de frittage en temps réel. L'IA ajuste des paramètres tels que la durée du broyage à boulets (20 à 40 heures, écart de $\pm 0,4$ heure) et la température de frittage (1400 à 1450°C , écart de $\pm 2^\circ\text{C}$) grâce à un algorithme de descente de gradient. L'efficacité de la production a augmenté de 18 à 22 % (la production par lot est passée de 100 à 120 pièces/heure, données industrielles).

Optimisation de l'amélioration de la surface

L'IA prédit l'épaisseur de la couche carburée ($10-30 \mu\text{m}$, erreur $< 4 \mu\text{m}$) et la dose d'implantation ionique ($10^{16}-10^{17} \text{ cm}^{-2}$, erreur $< 5\%$), et la cohérence de la dureté est améliorée à $< 1,8\%$ (HV 2000-2500). L'IIoT surveille la température carburée en temps réel ($850-950^\circ\text{C}$, écart $\pm 1,5^\circ\text{C}$) pour optimiser la qualité de la couche carburée.

Contrôle qualité et maintenance intelligente

L'IA et l'IIoT utilisent les données de performance de surface (dureté, taux d'usure) pour réaliser un contrôle qualité automatisé, avec un taux de réussite de 98,5 % (données industrielles). L'IA prédit les temps de défaillance (erreur < 4 heures) et l'IIoT optimise les stratégies de maintenance, réduisant les temps d'arrêt de 32 à 35 % et les taux d'accidents de 30 à 35 % (tests sur le terrain).

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

7.5.5 La première année de l'IA dans l'industrie chinoise du tungstène

2025 a été initialement définie par CTIA GROUP LTD comme la « première année de l'IA dans l'industrie chinoise du tungstène », marquant une nouvelle étape dans la transition de l'industrie chinoise du carbure cimenté vers la fabrication intelligente. Ce concept reflète non seulement l'application approfondie de l'IA et des technologies de l'Internet industriel des objets (IIoT) dans l'industrie du tungstène, mais souligne également l'objectif stratégique de la Chine de devenir une technologie de pointe dans l'industrie mondiale du carbure cimenté. Voici une description détaillée de l'importance pratique, de la forte entropie du carbure cimenté et de l'importance du dosage de ses nuances.

7.5.5.1 L'importance pratique du concept de « première année de l'IA dans l'industrie chinoise du tungstène »

CTIA GROUP LTD a proposé pour la première fois le concept « 2025 est la première année de l'IA dans l'industrie chinoise du tungstène » le 3 janvier 2025, reflétant les besoins de transformation technologique et la pression concurrentielle de l'industrie chinoise du tungstène sur le marché mondial du carbure cimenté.

Besoins de modernisation de l'industrie

Français La Chine est le plus grand producteur mondial de carbure cimenté, représentant plus de 60 % de la production mondiale en 2024 (données de la China Tungsten Industry Association), mais s'appuie depuis longtemps sur des procédés de fabrication traditionnels (tels que le pressage et le frittage), et il existe un écart en termes d'efficacité de production et de cohérence des performances avec les pays européens et américains (tels que Sandvik et Kennametal) (écart de consistance de dureté de 5 à 8 % contre 2 à 3 %). L'introduction de l'IA + IIoT optimise les paramètres de processus (tels que l'écart de température de frittage de $\pm 2^{\circ}\text{C}$) grâce à des données, augmentant l'efficacité de la production de 18 à 22 % (la production par lot unique est passée de 100 pièces à 120 pièces/heure) et réduisant l'écart de consistance de dureté à $< 2\%$, réduisant ainsi l'écart avec le niveau avancé international.

Autonomie technologique

Par le passé, la fabrication chinoise de carbure cimenté reposait sur des équipements et des technologies importés (comme le système de revêtement laser allemand). En 2025, CTIA GROUP LTD et l'Université Tsinghua ont développé conjointement un système national d'optimisation par IA, qui a optimisé le rapport additif (rapport VC/ TaC 1:1, erreur $< 0,03\%$) grâce à un algorithme génétique (GA), et la dureté a été portée à HV 1950-2000, permettant un contrôle indépendant de la technologie. La proposition de la première année d'IA marque la transformation de la Chine, passant du statut de suiveur technologique à celui de leader. Le taux d'application des équipements nationaux devrait passer de 40 % en 2024 à 65 % en 2026 (prévisions industrielles).

Amélioration de la compétitivité mondiale

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

L'IA et l'IIoT favorisent l'optimisation des performances du carbure cimenté (avec notamment une augmentation de la valeur K_{Ic} à 13-15 $\text{MPa} \cdot \text{m}^{1/2}$), rendant les produits chinois en carbure cimenté plus compétitifs dans les secteurs de l'aérospatiale (outils aéronautiques, par exemple) et de l'exploitation minière (durée de vie des forets augmentée de 20 %). En 2025, les exportations chinoises de carbure cimenté devraient augmenter de 15 % (environ 5 milliards de dollars US, selon les prévisions du ministère du Commerce), consolidant ainsi sa position sur le marché mondial.

7.5.5.2 Importance du traitement à haute entropie du carbure cimenté

Les métaux durs à haute entropie proposés par CTIA GROUP LTD font référence à la formation de métaux durs à base d'alliages à haute entropie (HEA) en introduisant plusieurs éléments (tels que W, Ti, Ta, Nb, Cr) pour améliorer la diversité et la stabilité des performances.

Percée en matière de performances

Français Il existe une contradiction entre la dureté et la ténacité du carbure cimenté WC-Co traditionnel (lorsque la dureté est HV 1800, K_{Ic} est généralement $< 10 \text{ MPa} \cdot \text{m}^{1/2}$). Une entropie élevée améliore considérablement les performances globales grâce à l'effet synergique de plusieurs éléments. En 2025, CTIA GROUP LTD prévoit de développer un carbure cimenté à haute entropie (W-Ti-Ta-Nb-Co) avec une dureté de HV 2100-2200 et une ténacité de K_{Ic} 14-16 $\text{MPa} \cdot \text{m}^{1/2}$ (essai par méthode de poutre entaillée sur un seul côté), ce qui est 20 à 30 % supérieur au WC-Co traditionnel.

Optimisation de la microstructure

Le traitement à haute entropie utilise des algorithmes d'IA (tels que l'apprentissage profond, DL) pour prédire le rapport des éléments ($\text{W}:\text{Ti}:\text{Ta}:\text{Nb} = 1:1:1:1$, erreur $< 0,05\%$), formant une phase uniforme à haute entropie (taille des grains 0,3-0,5 μm , mesure TEM), réduisant les défauts aux joints de grains ($< 0,1\%$). La résistance de liaison aux joints de grains est augmentée de 25 % ($> 180 \text{ MPa}$, test de nanoindentation) et la résistance à la fatigue est considérablement améliorée (durée de vie $> 1,5 \times 10^5$ fois, test de fatigue en flexion rotative).

Développement d'applications

Le carbure cimenté à haute entropie présente une excellente résistance aux températures élevées (dureté $> \text{HV } 1800$ à 800°C), ce qui le rend adapté aux outils de coupe pour aubes de turbines de moteurs d'avion. Sa durée de vie est augmentée de 30 % (de 12 heures à 15,6 heures, test sur le terrain). Sa résistance à la corrosion est augmentée de 20 % (pH en milieu acide < 4 , taux de corrosion $< 0,05 \text{ mm/an}$, test électrochimique), ce qui le rend adapté aux équipements d'exploitation minière en eaux profondes.

7.5.5.3 L'importance du dosage des nuances de carbure

Le dosage de nuances de carbure cimenté proposé par CTIA GROUP LTD fait référence à la gestion numérique des produits en carbure cimenté tout au long de leur cycle de vie grâce à la technologie AI+IIoT, à l'établissement d'une base de données de numéros de lots de nuances et à la réalisation

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

d'une traçabilité des performances et d'une production personnalisée.

Traçabilité des performances

Chaque lot de produits en carbure cimenté enregistre les paramètres de production (température de frittage : 1 400 °C, teneur en Co : 10 %) grâce à des capteurs IIoT, génère un numéro de lot unique et le stocke sur la plateforme cloud (capacité de données : > 1 To, 2 025). Les utilisateurs peuvent interroger les données de performance (dureté : HV : 1 750, K_{1c} : 13 MPa·m^{1/2}) via le numéro de lot afin de garantir la cohérence des performances (écart : < 1,5 %).

Production sur mesure

ajuste automatiquement la formule de nuance (comme WC-12Co+0,3% TaC) en fonction des besoins du client (comme les forets miniers nécessitent $K_{1c} > 14$ MPa·m^{1/2}), raccourcissant le cycle de production de 25 % (de 8 jours à 6 jours). La numérotation des lots prend en charge la personnalisation de petits lots pour répondre aux divers besoins de l'aérospatiale (outils à haute ténacité) et des nouvelles énergies (moules de batterie).

Amélioration de la gestion de la qualité

Le traitement par lots de marque utilise l'IA pour analyser les données historiques (> 100 000 lots), identifier les processus anormaux (tels qu'un écart granulométrique > 0,02 µm), optimiser les paramètres et améliorer considérablement le taux de réussite. L'efficacité de l'analyse des défaillances est améliorée de 30 %, et la traçabilité des numéros de lots permet de localiser rapidement les lots problématiques (< 1 heure), réduisant ainsi les coûts de rappel de 20 à 25 %.

7.5.6 Perspectives d'avenir et défis de l'amélioration des performances du carbure cimenté

Perspectives d'avenir pour l'amélioration des performances du carbure cimenté

Fabrication intelligente

L'IA et l'IIoT favoriseront davantage la transformation de la fabrication de carbure cimenté en usines intelligentes, et l'efficacité de la production devrait augmenter de 30 à 40 % en 2027 (prévisions McKinsey).

Optimisation multi-matériaux

L'IA peut prédire les performances des carbures composites cimentés multiphasés (tels que WC-Co-TiC), avec une dureté qui devrait dépasser HV 2000 et une ténacité atteignant $K_{1c} 15$ MPa·m^{1/2}.

Gestion du cycle de vie complet

L'IIoT permettra de suivre les performances des matières premières jusqu'aux applications et d'augmenter la prévision des pannes jusqu'à 10⁵ fois à l'avance.

Les défis de l'amélioration des performances du carbure

Qualité des données

Les modèles d'IA s'appuient sur des données de haute qualité. Les données industrielles actuelles présentent un bruit important (écart > 10 %) et la précision des capteurs doit être améliorée.

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

coût

IIoT (capteurs, modules 5G) sont coûteux à déployer et ont un faible retour sur investissement à court terme ($< 5\%$).

Sécurité

La transmission du réseau 5G présente un risque de fuite de données et la technologie de cryptage doit être renforcée (norme AES-256).

L'IA et l'IIoT offrent une nouvelle voie pour optimiser les performances du carbure cimenté. Grâce à l'optimisation de la microstructure (écart granulométrique $< 0,01 \mu\text{m}$, dureté améliorée de 15%), au suivi des performances en temps réel (durée $< 1,8\%$), à la prévision des défaillances (avance $> 10^4$ fois, taux de défaillance $< 0,08\%$) et à l'optimisation des procédés (efficacité de production améliorée de 18 à 22%), la constance des performances, la fiabilité et l'efficacité de production du carbure cimenté sont considérablement améliorées. À l'avenir, l'IA et l'IIoT favoriseront le développement de la fabrication du carbure cimenté vers une gestion intelligente et complète du cycle de vie, et fourniront des solutions plus efficaces et plus fiables pour l'aviation, l'exploitation minière, les nouvelles énergies et d'autres secteurs.

7.6 Normes nationales et internationales pertinentes

Voici les normes nationales et internationales relatives aux propriétés mécaniques du carbure cimenté, couvrant les normes chinoises, ISO, américaines et européennes, afin de garantir que les lecteurs puissent pleinement comprendre les bases de test et d'évaluation :

relatif aux propriétés mécaniques du carbure cimenté :

pour les propriétés du carbure cimenté » : spécifie les méthodes d'essai pour la dureté (HV), la ténacité à la rupture (K_{Ic}) et la résistance à la compression.

GB/T 3849-2008 Méthode d'essai pour la dureté Vickers du carbure cimenté : applicable aux essais de dureté (HV 1200-2000).

GB/T 7997-2010 Méthode d'essai pour la ténacité à la rupture du carbure cimenté : basée sur la méthode de la poutre entaillée à bord unique (SENB) pour tester K_{Ic} .

GB/T 3488-2008 « Méthodes d'essai pour la microstructure du carbure cimenté » : utilisée pour l'analyse de la taille des grains et de la microstructure.

relatif aux propriétés mécaniques du carbure cimenté :

ISO 28079:2009 « Méthode d'essai de la ténacité à la rupture des éprouvettes en carbure en forme de paume » : Essai K_{Ic} ($8-16 \text{ MPa} \cdot \text{m}^{1/2}$).

ISO 6507-1:2018 « Essai de dureté Vickers pour matériaux métalliques » : Applicable aux essais de dureté du carbure cimenté.

ISO 3327:2009 Méthode d'essai de résistance à la compression du carbure cimenté : Essai de résistance à la compression ($4000-6000 \text{ MPa}$).

ISO 3738-1:2010 Méthodes d'essai d'usure des carbures cimentés : basées sur des essais d'usure par abrasion (similaires à ASTM G65).

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

Normes américaines relatives aux propriétés mécaniques du carbure cimenté :

Méthode d'essai ASTM E399-20 pour la ténacité à la rupture des matériaux métalliques : essai K_{Ic} , applicable au carbure cimenté.

ASTM E647-15 « Méthode d'essai du taux de croissance des fissures de fatigue » : taux de croissance des fissures d'essai (da/dN).

ASTM E23-18 « Méthode d'essai d'impact sur éprouvette entaillée » : Énergie d'impact des tests Charpy et Izod.

Méthode d'essai d'usure des roues en sable sec/caoutchouc ASTM G65-16 : teste la résistance à l'usure du carbure cimenté (taux d'usure $< 0,1 \text{ mm}^3 / \text{N} \cdot \text{m}$).

Normes européennes relatives aux propriétés mécaniques du carbure cimenté :

EN ISO 6507-1:2018 « Essai de dureté Vickers » : conforme à la norme ISO 6507-1.

EN 843-1:2006 Méthode d'essai de ténacité à la rupture des céramiques avancées : applicable à l'essai K_{Ic} du carbure cimenté.

EN 1071-3:2005 « Méthodes d'essai pour l'usure des matériaux céramiques » : Applicable à l'essai de résistance à l'usure du carbure cimenté.

EN ISO 6892-1:2019 « Essais de traction des matériaux métalliques » : peut être utilisée pour les essais de résistance du carbure cimenté.

Références

- [1] Norme nationale. GB/T 18376-2001 « Méthode d'essai des propriétés du carbure cimenté ».
- [2] Norme nationale. GB/T 7997-2010 « Méthode d'essai de la ténacité à la rupture du carbure cimenté ».
- [3] Norme nationale. GB/T 3488-2008 « Méthode d'essai de la microstructure du carbure cimenté ».
- [4] Li Ming, et al. (2020). « Effet de la température de frittage sur la microstructure du carbure cimenté » . « Traitement thermique des métaux », 45(3), 12-18.
- [5] Zhang Wei, et al. (2021). « Effet de l'additif VC sur les propriétés du carbure cimenté » . « Technologie de la métallurgie des poudres », 39(4), 45-50.
- [6] Liu Yang, et al. (2022). « Effet de la teneur en Co sur les propriétés mécaniques du carbure cimenté » . « Journal of Materials Research », 36(5), 321-327.
- [7] Chen Lei, et al. (2023). « Effet de l'atmosphère de frittage sur les défauts de joint de grain dans le carbure cimenté » . Journal of the Chinese Society of Nonferrous Metals, 33(6), 89-95.
- [8] Zhao Gang, et al. (2024). « Effet de la vitesse de refroidissement sur la contrainte thermique du carbure cimenté » . Science et technologie des matériaux, 52(2), 101- 108.
- [9] Wang Qiang, et al. (2023). « Effet du broyage à boulets à haute énergie sur l'affinage du grain WC » . Journal of Materials Science and Engineering, 41(3), 234-240.
- [10] Li Qiang, et al. (2025). « Optimisation des performances du carbure cimenté pour les aubes de turbines d'aviation » . Journal of Aeronautical Materials, 45(1), 15-22.
- [11] ISO 3327:2009. Métaux durs — Détermination de la résistance à la compression .
- [12] ASTM E647-15. Méthode d'essai standard pour la mesure des *taux de croissance des fissures de fatigue* .

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

[13] ASTM G65-16. Méthode d'essai standard pour l'essai *d'abrasion sur roue en sable sec/caoutchouc* .

[14] Upadhyaya, GS (1998) . Carbures cémentés : production , propriétés *et tests* . Presses Wiley.

[15] Konyashin , I., et al. (2015). « Microstructure et propriétés des carbures cémentés WC-Co . » *Revue internationale des métaux réfractaires et des matériaux durs* , 49, 203-211 .

[16] Prakash, LJ (2016). « Modification de surface des carbures cémentés : une revue. » *Journal of Materials Science*, 51(10) , 4657-4671.

[17] Hall, EO (1951). « Déformation et vieillissement de l'acier doux : III. Discussion des résultats ». *Actes de la Société de physique* , 64(381) . 747- 753 .

[18] Schiotz, J., et al. (1998) . « Adoucissement des métaux à très petites tailles de grains . » *Nature* , 391 (6667) , 561-563.

RM (1996). *Théorie et pratique du frittage*. Wiley Press.

[20] Sandvik Coromant .

(2023) . « Données de performance des outils de coupe à grande vitesse. »

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

Copyright© 2024 CTIA All Rights Reserved
标准文件版本号 CTIAQCD-MA-E/P 2024 版
www.ctia.com.cn

电话/TEL: 0086 592 512 9696
CTIAQCD-MA-E/P 2018-2024V
sales@chinatungsten.com

CTIA GROUP LTD

30 Years of Cemented Carbide Customization Experts

Core Advantages

30 years of experience: We are well versed in cemented carbide production and processing , with mature and stable technology and continuous improvement .

Precision customization: Supports special performance and complex design , and focuses on customer + AI collaborative design .

Quality cost: Optimized molds and processing, excellent cost performance; leading equipment, RMI, ISO 9001 certification.

Serving Customers

The products cover cutting, tooling, aviation, energy, electronics and other fields, and have served more than 100,000 customers.

Service Commitment

1+ billion visits, 1+ million web pages, 100,000+ customers, and 0 complaints in 30 years!

Contact Us

Email : sales@chinatungsten.com

Tel : +86 592 5129696

Official website : www.ctia.com.cn

WeChat : Follow "China Tungsten Online"



COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

Copyright© 2024 CTIA All Rights Reserved
标准文件版本号 CTIAQCD-MA-E/P 2024 版
www.ctia.com.cn

电话/TEL: 0086 592 512 9696
CTIAQCD-MA-E/P 2018-2024V
sales@chinatungsten.com

Calendrier:

L'équilibre entre dureté et ténacité du carbure cimenté : principaux paramètres de performance

performance	Plage de paramètres	Scénario d'application	Remarque
Dureté (HV)	15002500±30	Outils d'aviation, forets miniers, moules résistants à l'usure	Une dureté élevée (HV>2000±30) peut facilement conduire à une diminution de la ténacité et nécessite un équilibre et une optimisation.
Ténacité (K _{IC})	820 MPa·m ^{1/2} ± 0,5	Outils d'aviation, forets miniers, moules résistants à l'usure	Une ténacité élevée (K _{IC} > 15 MPa·m ^{1/2} ± 0,5) s'accompagne souvent d'une diminution de la dureté, ce qui affecte la résistance à l'usure.
Résistance à la compression	>4000 MPa±100 MPa	Conditions de charge élevée	Elle est étroitement liée à la taille des grains et à la teneur en Co.
Couper la vie	>20 heures ±1 heure	Outils aéronautiques (coupe à grande vitesse > 1000 m/min)	WCCo à grains fins (0,5 μm±0,01 μm, Co 10 %±1 %), dureté HV 1800±30, durée de vie prolongée.
Distance de perçage	>1500 m±100 m	Trépans de forage minier	Co 8%±1% optimise la ténacité et améliore l'efficacité du perçage.
Nombre de pressions	>10 ⁶ fois ±10 ³ fois	Moule résistant à l'usure	Le raffinement du grain (0,5 μm ± 0,01 μm) améliore la durabilité.

Facteurs affectant la taille des grains : effet sur l'équilibre entre la dureté et la ténacité du carbure cimenté

facteur	Plage de paramètres	Impact sur les performances	Suggestions d'optimisation
Taille initiale des particules de poudre	0,51 μm ± 0,01 μm	La taille des particules < 1 μm augmente la dureté (HV > 1800 ± 30) ; > 2 μm la dureté < 1500 ± 30.	Utilisez une poudre de 0,51 ± 0,01 μm pour assurer un raffinement uniforme.
Temps de broyage à boulets	40 heures ± 1 heure (400 tr/min ± 10 tr/min)	Après 40 heures, la taille est réduite à 0,5 ± 0,01 μm et la dureté augmente de 30 % ± 5 % ; après < 20 heures, la taille est > 1 μm et les performances diminuent.	Le broyage à billes a été effectué pendant 40 h ± 1 h et la vitesse de rotation a été contrôlée à 400 tr/min ± 10 tr/min.
Température de frittage	1450°C±10°C	À 1450°C, la granulométrie est <0,7μm±0,01μm ; à >1500°C, la granulométrie est >2μm et la dureté diminue de 10%±2%.	Contrôle 1450°C±10°C pour éviter la croissance des grains.
Additifs (VC)	0,3% ± 0,01%	0,3 % inhibe la croissance des grains et augmente la dureté de 5 % ± 1 % ; > 0,5 % forme une phase cassante, K _{IC} < 8 MPa·m ^{1/2} ± 0,5.	Ajoutez VC 0,3 % ± 0,01 % et contrôlez la taille des grains à < 0,5 μm ± 0,01 μm.
Contenu Co	10% ± 1%	10 % ont une dureté équilibrée (HV 1800±30) et une ténacité (K _{IC} > 12 MPa·m ^{1/2} ± 0,5) ; <6 % ont une ténacité insuffisante.	Réglez Co 10%±1% pour garantir des performances équilibrées.
Atmosphère de frittage	Degré de vide < 10 ⁻³ Pa ± 10 ⁻⁴ Pa	Le vide évite l'oxydation (O ₂ < 0,1 ppm±0,01 ppm) et réduit les défauts aux limites des grains (< 0,1%±0,02%).	d'Ar de haute pureté (pureté > 99,99 % ± 0,01 %).

Facteurs influençant l'optimisation de la teneur en phase liante pour l'équilibre dureté/ténacité du carbure cimenté

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

facteur	Plage de paramètres	Impact sur les performances	Suggestions d'optimisation
Co ratio	8%10%±1%	± 30) et ténacité (K_{IC} 12 MPa · m ^{1/2} ± 0,5) ; < 6 % K_{IC} < 10 MPa · m ^{1/2} ± 0,5 .	Sélectionnez Co 8%10%±1% pour garantir des performances équilibrées.
Température de frittage	1450°C±10°C	1450°C assure une distribution uniforme du Co (écart <1%±0,2%) ; >1500°C forme un pool de Co (>10µm±1µm).	Contrôle 1450°C±10°C, écart de distribution Co <1%±0,2%.
Taille des particules de WC	0,51 µm ± 0,01 µm	0,51 µm améliore la liaison interfaciale ; > 2 µm K_{IC} diminue de 5 % ± 1 %.	Sélectionnez WC 0,51 µm ± 0,01 µm.
Additifs (VC)	0,3% ± 0,01%	0,3 % contrôle la diffusion du Co (taux <10 ⁻¹⁰ cm ² / s ± 10 ⁻¹¹ cm ² / s) ; > 0,5 % forme une phase cassante (> 1 % ± 0,2 %).	L'ajout de VC 0,3 % ± 0,01 % peut inhiber la diffusion du Co.
Pression de moulage	250 MPa ± 5 MPa	250 MPa augmente la densité (> 99,5 % ± 0,1 %) ; < 200 MPa porosité > 2 % ± 0,5 %.	Utiliser un pressage isostatique à froid à 250 MPa ± 5 MPa.
Temps de frittage	2 heures ± 0,1 heure	Mouillage contrôlé au Co pendant 2 heures (angle de contact < 5°±1°) ; taux de ségrégation au Co > 0,5%±0,1% pendant > 3 heures.	Le frittage a été effectué pendant 2 heures ± 0,1 heure pour assurer l'uniformité du Co.

Principaux paramètres de performance du carbure cimenté en termes de résistance à la fatigue et de résistance aux chocs

performance	Plage de paramètres	Scénario d'application	Remarque
Taux de croissance des fissures (da/ dN)	<10 ⁻⁶ mm/cycle±10 ⁻⁷ mm/cycle	Trépans miniers, outils de coupe pour l'aviation, moules résistants à l'usure	Un faible taux de croissance des fissures (par exemple 10 ⁻⁷ mm/cycle ± 10 ⁻⁸ mm/cycle) prolonge la durée de vie en fatigue (> 10 ⁵ fois ± 10 ⁴ fois).
Énergie d'impact	1050 J ± 1 J	Trépans miniers, outils de coupe pour l'aviation, moules résistants à l'usure	L'énergie d'impact Charpy de 20 J ± 1 J répond aux exigences d'impact à élevées (par exemple > 10 ³ Hz ± 100 Hz).
La fatigue de la vie	>10 ⁵ fois ± 10 ⁴ fois	Trépans miniers, moules résistants à l'usure	Le raffinement des grains (0,5 µm ± 0,01 µm) et l'optimisation du Co (10 % ± 1 %) améliorent considérablement la résistance à la fatigue.
Impact sur la vie	Forage > 1500 m±100 m, extrusion > 10 ⁶ fois±10 ⁵ fois	Trépans miniers, moules résistants à l'usure	K_{IC} élevé (12 MPa · m ^{1/2} ± 0,5) assure la fiabilité contre les chocs.

Facteurs affectant la croissance des fissures sur la résistance à la fatigue du carbure cimenté

facteur	Plage de paramètres	Impact sur les performances	Suggestions d'optimisation
Taille des grains	0,51 µm ± 0,01 µm	0,51 µm da/ dN < 10 ⁻⁷ mm/cycle ± 10 ⁻⁸ mm/cycle ; > 2 µm da/ dN > 10 ⁻⁶ mm/cycle ± 10 ⁻⁷ mm/cycle.	Sélectionnez WC 0,51 µm ± 0,01 µm.
Contenu Co	10% ± 1%	10 % K_{IC} > 12 MPa · m ^{1/2} ± 0,5, faible da/ dN ; < 6 % da/ dN augmentation de 30 % ± 5 %.	Ensemble Co 10%±1%.
Rapport de	0,1 ± 0,01	R=0,1 da/ dN <10 ⁻⁷ mm/cycle±10 ⁻⁸ mm/cycle ; R>0,5 da/ dN augmenté de	Contrôle R=0,1±0,01.

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

facteur	Plage de paramètres	Impact sur les performances	Suggestions d'optimisation
contrainte (R)		50 %±5 %.	
Additifs (VC)	0,3% ± 0,01%	0,3 % augmente la résistance des joints de grains (> 200 MPa ± 20 MPa) ; > 0,5 % phase cassante > 1 % ± 0,2 %.	Ajouter VC 0,3 % ± 0,01 %.
Rugosité de surface	Ra<0,05 μm±0,01 μm	Ra<0,05 μm, temps d'initiation des fissures>10 ⁴ fois ±10 ³ fois ;>0,1 μm, la durée de vie est réduite de 20 % ± 5 %.	Polissage jusqu'à Ra<0,05μm±0,01μm.
Défauts microscopiques	Porosité < 0,5 % ± 0,1 %	Porosité < 0,5 % da/ dN < 10 ⁻⁷ mm/cycle ± 10 ⁻⁸ mm/cycle ; > 1 % da/ dN augmentation de 40 % ± 5 %.	La porosité est contrôlée à <0,5%±0,1% et détectée par tomomodensitométrie.

Facteurs affectant la ténacité aux chocs du carbure cimenté

facteur	Plage de paramètres	Impact sur les performances	Suggestions d'optimisation
Contenu Co	10% ± 1%	10 % d'énergie d'impact > 20 J ± 1 J ; < 6 % d'énergie d'impact < 10 J ± 1 J.	Sélectionnez Co 10%±1%.
Taille des grains	0,51 μm ± 0,01 μm	0,51 μm K _{1c} > 12 MPa·m ^{1/2} ± 0,5 ; > 2 μm, l'énergie d'impact diminue de 20 % ± 5 %.	Sélectionnez WC 0,51 μm ± 0,01 μm.
Additifs (VC)	0,3% ± 0,01%	0,3 % d'énergie d'impact augmente de 10 % ± 2 % ; > 0,5 % de phase cassante > 1 % ± 0,2 %.	Ajouter VC 0,3 % ± 0,01 %.
Profondeur de l'encoche	2 mm ± 0,01 mm	Test standard de 2 mm ; réduction de l'énergie d'impact > 3 mm 30 % ± 5 %.	Contrôlez la profondeur de l'encoche à 2 mm ± 0,01 mm.
Densité frittée	>99,5%±0,1%	>99,5% d'énergie d'impact>20 J±1 J ; <99% de porosité>2%±0,5%.	Assurer une densité de frittage > 99,5 % ± 0,1 %.
Température d'essai	40°C±1°C	À 40°C, l'énergie d'impact est >15 J±1 J ; à <60°C, l'énergie d'impact diminue de 20%±5%.	Des tests à basse température vérifient les performances (40°C ± 1°C).

Principaux paramètres de performance du mécanisme de rupture du carbure cimenté

performance	Plage de paramètres	Scénarios d'échec	Remarque
Taux d'usure	< 0,06 mm ³ /N·m ± 0,01 mm ³ / N·m	Trépans miniers, outils de coupe pour l'aviation, moules résistants à l'usure	Taux d'usure élevés (> 0,06 mm ³ / N · m ± 0,01 mm ³ / N · m) entraînant une durée de vie réduite de l'outil (par exemple outil < 10 heures ± 1 heure).
Longueur de la fissure	<0,1 mm±0,01 mm	Outils d'aviation, forets miniers	Les microfissures (> 0,1 mm ± 0,01 mm) provoquent un écaillage et réduisent la fiabilité.
Taux de fracture	<0,1%±0,02%	Outils d'aviation, moules résistants à l'usure	Une valeur élevée de K _{1c} (12 MPa·m ^{1/2} ± 0,5) réduit le risque de fracture.
Taux de pelage	<0,1%±0,02%	Trépans miniers, moules résistants à l'usure	L'énergie interfaciale > 1 J/m ² ± 0,1 J/m ² réduit l'écaillage.

Facteurs affectant l'usure et la défaillance du carbure cimenté

facteur	Plage de paramètres	Impact sur les performances	Suggestions d'optimisation
dureté	HT 1800±30	HV 1800±30 : taux d'usure < 0,06 mm ³ / N · m ± 0,01 mm ³ / N · m ;	Assurer une dureté HV 1800±30.

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

facteur	Plage de paramètres	Impact sur les performances	Suggestions d'optimisation
		< 1500±30 : augmentation de 30%±5%.	
Taille des grains	0,51 µm ± 0,01 µm	0,51 µm : faible taux d'usure ; > 2 µm : augmentation de 20 % ± 5 %.	Sélectionnez WC 0,51 µm ± 0,01 µm.
Contenu Co	10% ± 1%	10 % d'usure adhésive en moins ; >12 % d'augmentation du taux d'usure de 15 % ± 3 %.	Ensemble Co 10%±1%.
Rugosité de surface	Ra<0,05 µm±0,01 µm	Ra<0,05µm, le taux d'usure est faible ; >0,1µm, il augmente de 25%±5%.	Polissage jusqu'à Ra<0,05µm±0,01µm.
Température de fonctionnement	<800°C±10°C	>800°C L'usure adhésive augmente de 50%±5%.	Utiliser du liquide de refroidissement pour contrôler la température <600°C±10°C.
Taille des particules abrasives	<50 µm ± 5 µm	<50µm : taux d'usure<0,06 mm ³ / N·m ± 0,01 mm ³ / N·m ; >100µm : le taux d'usure augmente de 40%±5%.	Contrôle de la taille des particules abrasives <50µm±5µm.

Facteurs affectant la fracture et l'écaillage du carbure cémenté

facteur	Plage de paramètres	Impact sur les performances	Suggestions d'optimisation
Ténacité (K _{1c})	>12 MPa·m ^{1/2} ± 0,5	K _{1c} >12 MPa·m ^{1/2} ± 0,5, le taux de fracture est <0,1%±0,02%; <10 MPa·m ^{1/2} ± 0,5, le taux de fracture augmente de 50%±5%.	Assurez-vous que K _{1c} > 12 MPa·m ^{1/2} ± 0,5.
Taille des grains	0,51 µm ± 0,01 µm	Le taux de croissance des fissures de 0,51 µm est lent ; le taux de fracture de > 2 µm augmente de 30 % ± 5 %.	Sélectionnez WC 0,51 µm ± 0,01 µm.
Contenu Co	10% ± 1%	10 % de desquamation en moins ; < 6 % le taux de desquamation augmente de 20 % ± 5 %.	Ensemble Co 10%±1%.
Défauts de surface	Fissure < 0,1 mm ± 0,01 mm	Pour les fissures > 0,1 mm, le taux de fracture augmente de 50 % ± 5 %.	La tomodensitométrie a été utilisée pour détecter les fissures et polir la surface.
Facteur de concentration de contrainte (K _t)	<2±0,1	K _t > 3 , le taux de pelage augmente de 40%±5%.	Coins arrondis (rayon > 0,5 mm ± 0,01 mm), K _t < 2 ± 0,1.
Interface énergétique	>1 J/m ² ± 0,1 J/m ²	>1 J/m ² , le taux d'écaillage diminue de 20%±5% ; <0,5 J/m ² , le taux d'écaillage augmente de 30%±5%.	Énergie interfaciale optimisée >1 J/m ² ± 0,1 J/m ² .

Principaux paramètres de performance de l'amélioration des performances du carbure cémenté

performance	Plage de paramètres	Scénario d'application	Remarque
Dureté (HV)	1800±2500±30	Outils d'aviation, forets miniers, moules résistants à l'usure	Les grains ultrafins (<0,2 ± 0,01 µm) et le renforcement de surface (comme le revêtement laser) peuvent atteindre > 3 000 ± 50.
Ténacité (K _{1c})	1015 MPa·m ^{1/2} ±	Trépan miniers, moules résistants	Les additifs (VC, TaC) et l'optimisation du Co (10%±1%) augmentent K _{1c} au-

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

performance	Plage de paramètres	Scénario d'application	Remarque
c)	0,5	à l'usure	dessus de 12 MPa · m ^{1/2} ± 0,5.
La fatigue de la vie	>10 ⁻⁵ fois ±10 ⁻⁴ fois	Moules résistants à l'usure, forets miniers	PIII (10 ⁻¹⁸ cm ⁻² ± 10 ⁻¹⁶ cm ⁻²) prolonge la durée de vie à > 10 ⁶ fois ± 10 ⁵ fois.
Taux d'usure	< 0,06 ± 0,01 mm ³ / N · m	Outils d'aviation, forets miniers	L'implantation ionique et le revêtement laser peuvent être réduits à < 0,04 mm ³ / N · m ± 0,01 mm ³ / N · m .

Affinage du grain et additifs : facteurs influençant l'amélioration des performances du carbure cémenté

facteur	Plage de paramètres	Impact sur les performances	Suggestions d'optimisation
Taille des grains	<0,5 µm ± 0,01 µm	<0,5 µm dureté>2000±30; >1 µm dureté<1800±30.	Sélectionnez WC<0,5 µm±0,01 µm et broyeur à boulets pendant 40 heures ± 1 heure.
Additifs (VC/ TaC)	0,3% ± 0,01%	0,3 % de dureté augmente de 5 % ± 1 %, K _{1c} augmente de 10 % ± 2 % ; > 0,5 % de phase cassante > 1 % ± 0,2 %.	Ajouter VC/ TaC 0,3 % ± 0,01 %.
Temps de broyage à boulets	40 heures ± 1 heure	Après 40 heures, la taille des grains est < 0,5 µm ± 0,01 µm ; après < 20 heures, la taille des grains est > 1 µm ± 0,01 µm.	Broyeur à boulets pendant 40 h ± 1 h (500 tr/min ± 10 tr/min).
Température de frittage	1450°C±10°C	À 1450°C, les grains sont stables ; à >1500°C, les grains sont >1µm±0,01µm.	Contrôlé à 1450°C±10°C, pression <10 ⁻³ Pa ± 10 ⁻⁴ Pa .
Contenu Co	10% ± 1%	10 % K _{1c} >12 MPa·m ^{1/2} ± 0,5 ; <6 % K _{1c} <10 MPa·m ^{1/2} ± 0,5.	Ensemble Co 10%±1%.
Ajout de ZrC	0,2% ± 0,01%	0,2 % dureté > 2500 ± 50 ; > 0,5 % K _{1c} diminue de 10 % ± 2 %.	Ajoutez du ZrC 0,2 % ± 0,01 % pour obtenir du WC à grains ultrafins.

Facteurs affectant le renforcement de surface du carbure cémenté et l'amélioration des performances

facteur	Plage de paramètres	Impact sur les performances	Suggestions d'optimisation
Température de cémentation	900°C±10°C	Une couche de WC (1050µm±1µm, HV>2500±50) se forme à 900°C ; le taux de fissures est>1%±0,2% à >1000°C.	Température contrôlée : 900°C±10°C, débit CH ₄ : 10 L/min±0,1 L/min.
Dose d'ions	10 ⁻¹⁷ cm ⁻² ± 10 ⁻¹⁶ cm ⁻²	10 ⁻¹⁷ cm ⁻² dureté >2200±30;>10 ⁻¹⁸ cm ⁻² dommages >1%±0,2%.	En utilisant N ⁺ , dose 10 ⁻¹⁷ cm ⁻² ± 10 ⁻¹⁶ cm ⁻² , énergie 100 keV ± 1 keV.
Taille des grains	0,51 µm ± 0,01 µm	0,51 µm a le meilleur effet de renforcement ; l'augmentation de la dureté > 2 µm est < 10 % ± 2 %.	Sélectionnez WC 0,51 µm ± 0,01 µm.
Contenu Co	10% ± 1%	La couche de renforcement à 10 % est stable ; le taux de fissures < 6 % augmente de 20 % ± 5 %.	Ensemble Co 10%±1%.
Rugosité de surface	Ra<0,05 µm±0,01 µm	Ra<0,05 µm a un faible taux d'usure ; >0,1 µm augmente de 15 % ± 3 %.	Polissage jusqu'à Ra<0,05µm±0,01µm.
Puissance laser	2 kW ± 0,1 kW	La couche de revêtement de 2 kW est uniforme (épaisseur 50100 µm ± 1 µm) ; > 3 kW le taux de fissure augmente de	La puissance du laser a été contrôlée à 2 kW±0,1 kW et la vitesse de balayage a été

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

facteur	Plage de paramètres	Impact sur les performances	Suggestions d'optimisation
		10 % ± 2 %.	contrôlée à 10 mm/s±0,1 mm/s.

www.chinatungsten.com

www.chinatungsten.com

en.com

www.ch

www.chinatungsten.com

www.chinatungsten.com

www.chinatungsten.com

www.chinatungsten.com

www.chinatun

1

www.chinatungsten.com

www.chinatungsten.com

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

appendice:

Quelle est la relation Hall-Petch ?

La relation Hall-Petch est un modèle théorique classique décrivant la relation entre les propriétés mécaniques des matériaux (principalement la résistance et la dureté) et la granulométrie. Elle est largement utilisée dans les métaux, les alliages et les matériaux céramiques (tels que le carbure cémenté WC-Co). Cette relation montre qu'à mesure que la granulométrie diminue, la résistance et la dureté du matériau augmentent significativement. Le mécanisme principal est l'effet perturbateur des joints de grains sur le mouvement des dislocations. La relation Hall-Petch a été proposée pour la première fois par EO Hall et NJ Petch en 1951 et 1953 respectivement, et est principalement utilisée pour étudier le comportement mécanique des matériaux polycristallins.

Concepts et formules de base

La relation Hall-Petch peut être exprimée par la formule mathématique suivante :

$$\sigma_y = \sigma_0 + k d^{-1/2}$$

或对于硬度:

$$HV = HV_0 + k' d^{-1/2}$$

其中:

- σ_y : 材料的屈服强度 (单位: MPa)。
- HV : 材料的硬度 (例如维氏硬度, 单位: HV)。
- σ_0 或 HV_0 : 单晶材料的屈服强度或硬度 (晶粒尺寸趋于无穷大时的极限值), 反映晶粒内部的固有阻力。
- k 或 k' : Hall-Petch常数, 与材料类型和晶界特性相关 (单位: $\text{MPa} \cdot \text{m}^{1/2}$ 或 $\text{HV} \cdot \text{m}^{1/2}$)。
- d : 平均晶粒尺寸 (单位: m, 通常为 μm 量级)。
- $d^{-1/2}$: 晶粒尺寸的倒数平方根, 表示晶界密度的增加。

直观解释: 晶粒尺寸越小 (d 越小), $d^{-1/2}$ 越大, 晶界密度越高, 位错运动受阻越明显, 因此材料的强度和硬度 (σ_y 或 HV) 越高。

Mécanisme microscopique

La base physique de la relation Hall-Petch réside dans l'effet perturbateur des joints de grains sur le mouvement des dislocations. Les propriétés mécaniques des matériaux polycristallins sont principalement affectées par les mécanismes suivants :

Les joints de grains entravent le mouvement des dislocations :

Dans les matériaux polycristallins, les joints de grains entre les grains constituent des obstacles naturels au mouvement des dislocations. Ces dernières sont porteuses de déformation plastique des matériaux. Lorsque les dislocations se déplacent vers les joints de grains, elles ne peuvent pas facilement les franchir en raison de la différence d'orientation des joints de grains (l'angle de déflexion des joints de grains est généralement compris entre 20° et 40°) et de l'énergie des joints

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

de grains ($> 1,5 \text{ J/m}^2$).

Les dislocations s'accumulent aux joints de grains, formant des empilements de dislocations, ce qui entraîne des concentrations locales de contraintes. Le franchissement des joints de grains nécessite des contraintes plus élevées, ce qui se traduit par une augmentation de la limite d'élasticité.

Augmentation de la densité des joints de grains :

À mesure que la taille des grains diminue (par exemple, de $2 \mu\text{m}$ à $0,5 \mu\text{m}$), la densité des joints de grains augmente considérablement (de $\sim 10^{12} \text{ m}^{-2}$ à $> 10^{13} \text{ m}^{-2}$). Plus la densité des joints de grains est élevée, plus il y a d'obstacles au mouvement des dislocations par unité de volume, et la résistance et la dureté du matériau augmentent en conséquence.

diminue de $2 \mu\text{m}$ à $0,5 \mu\text{m}$, la densité des joints de grains augmente d'environ 4 fois et l'augmentation de la dureté peut atteindre 25 à 30 % (par exemple de HV 1200 à HV 1600).

Mécanisme de renforcement d'Orowan :

Les joints de grains améliorent les propriétés des matériaux en fixant les dislocations (similaire au mécanisme de renforcement d'Orowan).

晶界通过钉扎位错（类似Orowan强化机制）增强材料性能。位错绕过晶界的剪应力 (τ) 与晶界间距 (λ) 相关: $\tau \sim Gb/\lambda$, 其中 G 为剪切模量, b 为伯氏矢量, λ 与晶粒尺寸 d 成正比 ($\lambda \sim d$)。晶粒尺寸越小, λ 越小, 剪应力越高, 材料越强硬。

Migration et stabilité des limites des grains :

La stabilité thermodynamique des joints de grains a une influence importante sur la relation Hall-Petch. La vitesse de migration des joints de grains (généralement $< 10^{-10} \text{ m/s}$) est contrôlée par la température de frittage ($1400\text{-}1500 \text{ }^\circ\text{C}$) et les additifs (tels que le VC 0,2 %-0,5 %), et la barrière de migration est de $80\text{-}120 \text{ kJ/mol}$. Des joints de grains stables (faible vitesse de migration) contribuent au maintien d'une structure granulaire fine et donc d'une résistance élevée.

Champ d'application de la relation Hall-Petch

La relation Hall-Petch fonctionne très bien dans une certaine gamme de tailles de grains, mais échoue dans les cas extrêmes :

Champ d'application (grosse granulométrie, $> 0,2 \mu\text{m}$) :

Pour la plupart des carbures cémentés (tels que le WC-Co), la relation Hall-Petch est vraie lorsque la granulométrie est comprise entre $0,2 \mu\text{m}$ et $10 \mu\text{m}$. Par exemple, lorsque la granulométrie du WC-10Co diminue de $2 \mu\text{m}$ à $0,5 \mu\text{m}$, la dureté augmente de HV 1200 à HV 1600, soit une augmentation d'environ 25 à 30 %, et la limite d'élasticité augmente d'environ 20 à 25 % (de 3500 MPa à 4500 MPa).

À ce stade, le principal mécanisme de renforcement est la limite des grains qui entrave le mouvement de dislocation.

Plage de défaillance (la taille des grains est trop petite, $< 0,2 \mu\text{m}$) :

Lorsque la taille des grains est réduite à l'échelle nanométrique ($< 0,2 \mu\text{m}$, par exemple $< 100 \text{ nm}$),

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

la relation Hall-Petch peut être rompue et un « effet Hall-Petch inverse » peut se produire. À ce stade, le glissement des joints de grains devient le principal mécanisme de déformation, entraînant une diminution de la résistance et de la dureté.

Raison : La proportion de joints de grains est trop élevée ($> 50\%$), l'énergie d'interface domine la performance ($> 1,5 \text{ J/m}^2$), le glissement et la diffusion des joints de grains (comme le fluage de Coble) sont intensifiés et la ténacité diminue (K_{IC} passe de $12 \text{ MPa}\cdot\text{m}^{1/2}$ à $< 8 \text{ MPa}\cdot\text{m}^{1/2}$).

Par exemple, lorsque la taille des grains de WC est réduite de $0,5 \mu\text{m}$ à $0,1 \mu\text{m}$, la dureté peut chuter de HV 1600 à HV 1400 et la ténacité diminue considérablement ($K_{IC} < 8 \text{ MPa}\cdot\text{m}^{1/2}$).

Conditions de température élevée :

À haute température ($> 800^\circ\text{C}$), la vitesse de migration des joints de grains augmente ($> 10^{-9} \text{ m/s}$) et les grains peuvent grossir anormalement ($> 2 \mu\text{m}$), ce qui affaiblit l'effet Hall-Petch. Par exemple, à 1000°C , la taille des grains du WC-10Co peut croître de $0,5 \mu\text{m}$ à $2 \mu\text{m}$ et la dureté diminuer de 10 à 15 % (de HV 1600 à HV 1400).

Facteurs affectant la relation Hall-Petch

La performance de la relation Hall-Petch est affectée par les facteurs suivants :

Granulométrie (d) :

La granulométrie est la variable clé de la relation Hall-Petch. Plus le grain est petit, plus la densité des joints de grains est élevée et plus l'effet de renforcement est évident. Par exemple, lorsque la granulométrie du WC passe de $1 \mu\text{m}$ à $0,5 \mu\text{m}$, la dureté augmente d'environ 15 à 20 %.

Cependant, les grains trop petits ($< 0,2 \mu\text{m}$) entraîneront l'effet Hall-Petch inverse, et des additifs (tels que VC 0,2%-0,5%) sont nécessaires pour inhiber le glissement des joints de grains.

Type de matériau et caractéristiques des joints de grains :

Hall-Petch常数 k 与材料类型和晶界特性密切相关。对于硬质合金WC-Co, k 值通常在 $0.5-1.0 \text{ MPa}\cdot\text{m}^{1/2}$ 之间, 受Co含量和晶界强度影响。

Co含量高 (如15%) 时, 晶界润湿性增强 (接触角 $<15^\circ$), 晶界强度降低 ($<100 \text{ MPa}$), k 值减小, 强化效果减弱; Co含量低 (如6%) 时, 晶界强度高 ($>150 \text{ MPa}$), k 值增大。

3. Additifs :

L'ajout d'inhibiteurs de grains (tels que VC 0,2 %-0,5 %, Cr_3C_2 0,1 %-0,3 %) peut réduire la taille des grains et renforcer l'effet Hall-Petch. Par exemple, l'ajout de 0,4 % de VC peut réduire la taille des grains de WC de $1 \mu\text{m}$ à $0,5 \mu\text{m}$ et augmenter la dureté de 5 % à 10 % (de HV 1500 à HV 1600). Cependant, des additifs excessifs ($> 0,8\%$) peuvent former des phases cassantes (telles que la phase VCx, rapport $> 0,5\%$) et réduire la ténacité ($K_{IC} < 8 \text{ MPa}\cdot\text{m}^{1/2}$).

Procédé de frittage :

de frittage ($1400-1500^\circ\text{C}$) et le vide ($< 10^{-2} \text{ Pa}$) affectent la taille des grains et la stabilité des joints de grains. Une température trop élevée ($> 1550^\circ\text{C}$) entraîne une croissance des grains ($> 2 \mu\text{m}$) et une baisse de la dureté de 10 à 15 %.

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

Par exemple, lorsque le WC-10Co est fritté à 1450°C, la taille des grains reste à 0,5 µm et la dureté atteint HV 1600 ; lorsqu'il est fritté à 1600°C, la taille des grains augmente jusqu'à 2 µm et la dureté chute à HV 1400.

Contenu du co :

La teneur en Co influence la mouillabilité des joints de grains et leur aptitude à la déformation plastique. Lorsque la teneur en Co est faible (par exemple 6 %), le renforcement des joints de grains est significatif et la dureté est élevée (HV > 1600) ; lorsque la teneur en Co est élevée (par exemple 15 %), les joints de grains se ramollissent et la dureté diminue (HV < 1200).

Par exemple, le WC-6Co (granulométrie de 0,5 µm) a une dureté de HV 1700, tandis que le WC-15Co (même granulométrie) a une dureté de seulement HV 1200.

Défauts microscopiques :

La porosité (> 1 %) et les microfissures (longueur > 0,05 mm) affaiblissent l'effet de renforcement des joints de grains et réduisent la dureté et la résistance. Par exemple, une augmentation de la porosité de 0,5 % à 2 % réduit la dureté d'environ 5 % (de HV 1600 à HV 1520).

Application du carbure cimenté

Dans les carbures cimentés (tels que WC-Co), la relation Hall-Petch est largement utilisée pour contrôler la taille des grains afin d'optimiser les propriétés :

Le raffinement du grain augmente la dureté :

La taille des grains a été réduite de 2 µm à 0,5 µm par broyage à billes à haute énergie (300-500 tr/min, 20-40 heures), ajout d'inhibiteurs de grains (tels que VC 0,2%-0,5%) et processus de frittage optimisé (1400-1500°C, vide < 10⁻² Pa).

Résultat : La dureté est passée de HV 1200 à HV 1600 et la limite d'élasticité est passée de 3500 MPa à 4500 MPa, répondant ainsi aux exigences de coupe à grande vitesse (> 800 m/min).

Équilibre entre dureté et ténacité :

Des grains trop petits (< 0,2 µm) entraîneront une ténacité réduite ($K_{Ic} < 8 \text{ MPa} \cdot \text{m}^{1/2}$), ce qui ne convient pas aux scénarios à fort impact (tels que les forêts minières). Par conséquent, la granulométrie doit être contrôlée dans la plage de 0,5 à 1 µm pour obtenir un équilibre entre dureté (HV 1600) et ténacité ($K_{Ic} 12-14 \text{ MPa} \cdot \text{m}^{1/2}$).

Par exemple, le WC-10Co (granulométrie 0,5 µm) a une dureté de HV 1600 et un K_{Ic} de 12 $\text{MPa} \cdot \text{m}^{1/2}$, ce qui le rend adapté aux outils aéronautiques.

Optimisation des applications d'ingénierie :

µm grâce à la relation Hall-Petch, la dureté atteint HV 1700 et la durée de vie de coupe > 15 heures.

Trépan minier : granulométrie 0,8 µm, dureté HV 1500, $K_{Ic} 13 \text{ MPa} \cdot \text{m}^{1/2}$, distance de perçage > 1200 m.

Moule résistant à l'usure : granulométrie 0,5 µm, dureté HV 1600, temps d'extrusion > 10⁶ fois.

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

Limites et défis

Bien que la relation Hall-Petch soit largement utilisée dans les carbures cémentés, elle présente également les limitations et les défis suivants :

Effet Hall-Petch inversé :

La granulométrie est trop petite ($< 0,2 \mu\text{m}$), la déformation est dominée par le glissement et la diffusion des joints de grains, et la résistance et la dureté diminuent. Par exemple, si la granulométrie du WC passe de $0,5 \mu\text{m}$ à $0,1 \mu\text{m}$, la dureté peut chuter de HV 1600 à HV 1400.

Les défis de la stabilité des joints de grains :

le temps de frittage (> 4 heures) provoquera une croissance des grains ($> 2 \mu\text{m}$), réduisant l'effet Hall-Petch. VC ou Cr_3C_2 doit être ajouté pour inhiber la croissance des grains.

Risques de résilience réduite :

Bien que le raffinement des grains augmente la dureté, il peut conduire à une diminution de la ténacité ($K_{IC} < 10 \text{ MPa} \cdot \text{m}^{1/2}$), et les performances doivent être équilibrées en optimisant la teneur en Co (8%-12%) et la taille des grains ($0,5\text{-}1 \mu\text{m}$).

L'impact des micro- défauts :

La porosité ($> 1\%$) et les microfissures (longueur $> 0,05 \text{ mm}$) peuvent affaiblir l'effet de renforcement des joints de grains. Par exemple, la dureté du WC-10Co hautement poreux (2 % de porosité) n'est que de HV 1520, ce qui est bien inférieur à la valeur attendue (HV 1600).

Tendance de développement

Avec le développement de la science des matériaux et de la fabrication intelligente, l'application de la relation Hall-Petch dans le carbure cémenté s'approfondit :

Technologie des cristaux nanocristallins et ultrafins :

Développer des carbures cémentés à grains ultrafins ($< 0,5 \mu\text{m}$) et nanocristallins ($< 100 \text{ nm}$) avec une dureté allant jusqu'à HV 2000, mais le problème du glissement des joints de grains doit être résolu (par exemple en ajoutant du TaC 0,2%-0,5% pour améliorer la résistance des joints de grains).

Conception de structure de gradient :

La relation Hall-Petch est utilisée pour concevoir un carbure cémenté à structure à gradient avec des grains de surface fins ($0,2\text{-}0,5 \mu\text{m}$, dureté HV 1700) et des grains internes légèrement plus gros ($1\text{-}2 \mu\text{m}$, $K_{IC} < 14 \text{ MPa} \cdot \text{m}^{1/2}$), permettant une optimisation synergique de la dureté et de la ténacité.

Optimisation assistée par l'IA :

L'IA permet de prédire l'effet de la granulométrie sur les performances (précision de prédiction $> 90\%$) et d'optimiser les paramètres de broyage à boulets et de frittage. Par exemple, l'apprentissage automatique permet de prédire la granulométrie optimale ($0,5 \mu\text{m}$) avec un écart de dureté inférieur à 2 %.

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

Performances améliorées à haute température :

Développer des inhibiteurs de joints de grains stables à haute température (tels que ZrC 0,1%-0,3%) pour maintenir la taille des grains ($<1 \mu m$) à $>800^{\circ}C$ et maintenir l'effet Hall-Petch.

En résumé, la relation Hall-Petch révèle l'influence de la granulométrie sur les propriétés mécaniques du carbure cimenté et constitue la base théorique de l'affinage du grain et de l'optimisation des performances. Une régulation rationnelle de la granulométrie et des caractéristiques des joints de grains permet d'améliorer considérablement la dureté et la résistance, mais il convient de veiller à l'équilibre entre ténacité et stabilité à haute température. Avec l'introduction de nouvelles technologies et d'une fabrication intelligente, la relation Hall-Petch jouera un rôle accru dans le domaine du carbure cimenté.

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

Copyright© 2024 CTIA All Rights Reserved
标准文件版本号 CTIAQCD-MA-E/P 2024 版
www.ctia.com.cn

电话/TEL: 0086 592 512 9696
CTIAQCD-MA-E/P 2018-2024V
sales@chinatungsten.com

appendice

Qu'est-ce que le carbure cimenté à structure à gradient ?

Le carbure cimenté à structure graduelle (WC-Co) est un type de carbure cimenté conçu et régulé de manière à ce que sa microstructure ou sa composition (comme la granulométrie, la teneur en phase de liaison ou la distribution des additifs) présente un changement graduel dans une direction spécifique (par exemple, de la surface vers l'intérieur). Cette structure est conçue pour combiner les avantages de performances de différentes régions, comme une dureté superficielle élevée et une ténacité interne élevée, afin de répondre aux exigences de performance globales des conditions d'utilisation difficiles (comme les outils aéronautiques et les foreuses minières). Comparé au carbure cimenté traditionnel, le carbure cimenté à structure graduelle présente des avantages significatifs en termes d'optimisation des performances, mais il pose également de nouveaux défis aux nuances et aux méthodes de production traditionnelles, et impose des exigences plus élevées en matière de contrôle intelligent de la conception de la production (AI Agent).

Concepts et principes de base de la structure à gradient du carbure cimenté

Le carbure cimenté est généralement composé d'une phase dure (comme le WC, qui présente une dureté élevée mais une grande fragilité) et d'une phase de liaison (comme le Co, qui présente une bonne ténacité mais une faible dureté). Le carbure cimenté traditionnel (comme YG6, YG8 et autres nuances) présente une microstructure uniforme, et la teneur en Co et la granulométrie sont globalement constantes dans tout le matériau, ce qui rend difficile de satisfaire simultanément aux exigences de dureté et de ténacité élevées. Par exemple, YG6 (Co 6 %) présente une dureté élevée (HV 1600-1700), mais une faible ténacité (K_{IC} c 8-10 MPa·m^{1/2}) ; YG15 (Co 15 %) présente une bonne ténacité (K_{IC} c 14-16 MPa·m^{1/2}), mais une dureté réduite (HV 1200-1300).

Le carbure cimenté à structure à gradient permet une optimisation synergique des fonctions en introduisant des gradients de performance dans différentes zones du matériau :

surface

La teneur en Co est faible (par exemple 4 à 6 %), la granulométrie est fine (par exemple 0,2 à 0,5 μm), la dureté est élevée (HV 1600 à 1800), la résistance à l'usure est forte et il convient pour résister à un frottement et à une usure élevés.

Couche intermédiaire

La teneur en Co et la taille des grains évoluent progressivement (par exemple Co 8%-10%, grain 0,5-1 μm), l'épaisseur 0,5-2 mm et la concentration des contraintes d'interface diminuent (<80 MPa).

interne

La teneur en Co est relativement élevée (par exemple 12%-15%), la taille des grains est légèrement plus grande (par exemple 1-2 μm), la ténacité est excellente (K_{IC} c 14-16 MPa·m^{1/2}), la résistance aux chocs est forte et il peut absorber l'énergie des fissures et empêcher la fracture.

Cette distribution de gradient est obtenue en régulant la diffusion du Co, la croissance des grains et les processus de frittage. Les propriétés mécaniques sont basées sur la théorie des matériaux

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

Copyright© 2024 CTIA All Rights Reserved
标准文件版本号 CTIAQCD-MA-E/P 2024 版
www.ctia.com.cn

电话/TEL: 0086 592 512 9696
CTIAQCD-MA-E/P 2018-2024V
sales@chinatungsten.com

composites (comme le modèle de Voigt, $E \sim V_{WC} \cdot E_{WC} + V_{Co} \cdot E_{Co}$) et la relation de Hall-Petch ($\sigma \sim d^{-1/2}$), de sorte que le matériau présente des duretés, des résistances et des ténacités différentes selon la profondeur. La structure du gradient peut également être optimisée en contrôlant l'énergie d'interface ($< 1,5 \text{ J/m}^2$) et la dynamique des joints de grains (taux de migration $< 10^{-10} \text{ m/s}$).

Méthode de conception de structure à gradient

La conception du carbure cémenté à structure à gradient se concentre principalement sur les aspects suivants :

Gradient de teneur en Co :

La teneur en Co à la surface est faible (4 à 6 %), la couche intermédiaire en contient 8 à 10 % et augmente progressivement jusqu'à 12 à 15 % à l'intérieur.

Principe : Lorsque la teneur en Co est faible, la fraction volumique de WC est élevée ($> 90\%$) et la dureté est améliorée ; lorsque la teneur en Co est élevée, la capacité de déformation plastique est améliorée (taux de déformation $\sim 10^{-3} \text{ s}^{-1}$) et la ténacité est améliorée.

Méthode de mise en œuvre : Par rapport de poudre en couches (le rapport de poudre de Co augmente de l'extérieur vers l'intérieur) ou contrôle de la vitesse de diffusion du Co pendant le frittage ($< 10^{-9} \text{ cm}^2/\text{s}$). Par exemple, trois couches de poudre sont empilées : couche superficielle Co 4 %, couche intermédiaire Co 8 %, couche intérieure Co 12 %, et un gradient est formé par frittage en phase liquide.

Gradient granulométrique :

Les grains de surface sont fins ($0,2\text{-}0,5 \mu\text{m}$), la couche intermédiaire mesure $0,5\text{-}1 \mu\text{m}$ et les grains internes sont légèrement plus gros ($1\text{-}2 \mu\text{m}$).

Principe : Les petits grains augmentent la dureté et la résistance grâce à l'effet Hall-Petch ($HV \sim d^{-1/2}$); les grains plus gros réduisent le glissement des joints de grains (surface des joints de grains $< 10^{-13} \text{ m}^{-2}$) et améliorent la ténacité.

Méthode de mise en œuvre : Ajouter des inhibiteurs de grains sur la surface (tels que VC 0,2%-0,5%, Cr_3C_2 0,1%-0,3%), réduire les inhibiteurs dans la couche intermédiaire et à l'intérieur ; ou contrôler la vitesse de croissance des grains par frittage en couches (surface $< 10^{-10} \text{ m/s}$, légèrement plus élevée à l'intérieur).

Gradient de distribution additif :

Ajoutez plus de VC ou de Cr_3C_2 (0,2 % à 0,5 %) sur la surface pour inhiber la croissance des grains et améliorer la dureté ; ajoutez une petite quantité de TaC (0,1 % à 0,3 %) dans la couche intermédiaire pour augmenter la résistance aux joints de grains ($> 150 \text{ MPa}$) ; ajoutez du TaC (0,2 % à 0,5 %) à l'intérieur pour améliorer encore la ténacité.

Méthode de mise en œuvre : Rapport d'additifs stratifiés, combiné au contrôle du processus de frittage. Par exemple, ajouter 0,4 % de VC à la couche superficielle, 0,2 % de TaC à la couche intermédiaire et 0,3 % de TaC à la couche interne .

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

Gradient fonctionnel :

Un revêtement résistant à l'usure (tel que CrN ou TiN , épaisseur 2-4 μm , dureté HV 3000-3500) est introduit sur la surface, la couche intermédiaire optimise la résistance à la fatigue (taux de croissance des fissures $\text{da}/\text{dN} < 10^{-7} \text{ mm/cycle}$), et la partie interne optimise la résistance aux chocs (énergie d'impact $> 18 \text{ J}$).

Méthode de mise en œuvre : Combinaison de modification de surface (telle que carburation, implantation ionique) et d'optimisation de la microstructure interne.

Gradient multiphasé :

Présentation d'une structure multiphasée, telle que l'ajout d'une petite quantité de TiC (dureté $> 2000 \text{ HV}$, 5%-10%) sur la surface pour améliorer la résistance à l'usure, la couche intermédiaire est une couche de transition WC-Co, et la structure WC-Co est maintenue à l'intérieur pour assurer la ténacité.

Méthode de mise en œuvre : Ajouter de la poudre de TiC en couches et former un gradient multiphasé par frittage.

Diversification des directions du gradient :

Outre les gradients radiaux de la surface vers l'intérieur, des gradients latéraux (tels que la dureté élevée du tranchant de l'outil et la ténacité élevée de la pièce de serrage) ou des gradients multidirectionnels (adaptés aux pièces géométriques complexes) peuvent également être conçus.

Méthode de mise en œuvre : Utiliser la technologie d'impression 3D (telle que la fusion laser sélective SLM) pour contrôler avec précision la composition et la structure de chaque zone.

Technologie de préparation du carbure cimenté à structure à gradient

La préparation du carbure cimenté à structure à gradient doit être réalisée selon les procédés suivants :

Dosage et formage de poudre

Le corps vert a été préparé par la méthode de la poudre en couches, avec des poudres mixtes WC-Co présentant différents teneurs en Co, granulométries ou ratios d'additifs, utilisées en surface, au milieu et à l'intérieur. Par exemple, couche superficielle (Co 4 %, WC 0,5 μm), couche intermédiaire (Co 8 %, WC 1 μm) et couche intérieure (Co 12 %, WC 1,5 μm).

Le pressage isostatique à froid (CIP, pression 200-300 MPa) est utilisé pour assurer la densité ($> 99\%$) et l'uniformité (porosité $< 0,5\%$) du corps vert.

Exigences de précision : écart du rapport de poudre $< 0,1\%$, écart d'épaisseur de couche $< 0,02 \text{ mm}$, résistance de liaison intercouche $> 50 \text{ MPa}$.

Procédé de frittage :

Frittage en phase liquide (1400-1500°C, 1-3 heures, degré de vide $< 10^{-2} \text{ Pa}$), la vitesse de diffusion du Co ($< 10^{-9} \text{ cm}^2/\text{s}$) est contrôlée par le gradient de température et le temps pour former une distribution de gradient.

Gradient de température de frittage

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

La température de surface est légèrement inférieure (1400°C), ce qui inhibe la croissance des grains ; la couche intermédiaire est de 1420°C et la partie intérieure est de $1450\text{-}1500^{\circ}\text{C}$, ce qui favorise la diffusion du Co et une croissance modérée des grains.

Atmosphère de frittage : atmosphère sous vide ou Ar (pureté $> 99,99\%$), éviter l'oxydation (teneur en $\text{O}_2 < 0,5\text{ ppm}$), réduire les défauts aux joints de grains ($< 0,2\%$).

Vitesse de refroidissement : contrôlée à $3\text{-}5^{\circ}\text{C}/\text{min}$ pour éviter les contraintes thermiques ($< 100\text{ MPa}$) ; si $> 10^{\circ}\text{C}/\text{min}$, le taux de microfissures est $> 0,5\%$.

Traitement thermique et modification de surface

Le recuit ($550\text{-}650^{\circ}\text{C}$, 1-2 heures) réduit la contrainte interne de la phase Co ($< 50\text{ MPa}$) et augmente K_{IC} d'environ 5% .

Cémentation superficielle ($850\text{-}950^{\circ}\text{C}$, atmosphère CH_4 , épaisseur de la couche de carbone $10\text{-}30\text{ }\mu\text{m}$) ou implantation ionique (N^+ , dose $10^{16}\text{-}10^{17}\text{ cm}^{-2}$, énergie $80\text{-}120\text{ keV}$) pour former une couche de dureté élevée (HV $1800\text{-}2000$).

Le revêtement laser (puissance $1,5\text{-}2,5\text{ kW}$, épaisseur $50\text{-}100\text{ }\mu\text{m}$) forme une couche de dureté ultra élevée (HV >2500).

L'implantation ionique améliorée par plasma (PIII, dose $10^{17}\text{-}10^{18}\text{ cm}^{-2}$) améliore la résistance à l'usure profonde (profondeur $> 0,5\text{ }\mu\text{m}$).

Surveillance et contrôle en ligne

en utilisant un analyseur de taille de particules laser (écart $< 0,02\text{ }\mu\text{m}$), et la contrainte aux limites des grains ($< 100\text{ MPa}$) a été évaluée en utilisant la diffraction des rayons X (DRX, écart de largeur de pic $< 0,2^{\circ}$).

Le processus de frittage a été surveillé en temps réel à l'aide d'un capteur de température (précision $\pm 2^{\circ}\text{C}$), d'un capteur de pression (précision $\pm 10^{-3}\text{ Pa}$) et d'un microscope en ligne (résolution $< 0,1\text{ }\mu\text{m}$) pour garantir la cohérence de la structure du gradient (écart $< 0,5\%$).

La technologie d'émission acoustique (gamme de fréquences $20\text{ kHz}\text{-}500\text{ kHz}$) a été utilisée pour détecter les microfissures (longueur $> 0,05\text{ mm}$) pendant le processus de frittage.

Caractéristiques de performance et avantages du carbure cémenté à structure à gradient

Le carbure cémenté à structure à gradient présente les caractéristiques suivantes grâce à l'optimisation coordonnée des performances :

Équilibre entre dureté et ténacité

Dureté superficielle élevée (HV $1600\text{-}1800$) et excellente ténacité interne (K_{IC} $c 14\text{-}16\text{ MPa}\cdot\text{m}^{1/2}$), surmontant la contradiction entre dureté et ténacité du carbure cémenté traditionnel.

Par exemple, le WC-10Co à gradient avec 4% de Co en surface et un grain de $0,5\text{ }\mu\text{m}$ a une dureté de HV 1700 , 12% de Co à l'intérieur et K_{IC} $c 14\text{ MPa}\cdot\text{m}^{1/2}$, et ses performances globales sont meilleures que celles du YG8 traditionnel (Co 8% , HV 1500 , K_{IC} $c 12\text{ MPa}\cdot\text{m}^{1/2}$).

Amélioration synergique de la résistance à l'usure et de la résistance aux chocs

La dureté de surface élevée et la faible teneur en Co réduisent le taux d'usure ($< 0,08\text{ mm}^3 / \text{N}\cdot\text{m}$) ;

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

la teneur élevée en Co à l'intérieur augmente l'énergie d'impact (18-20 J).

Convient aux scénarios de frottement et d'impact élevés, tels que les forets miniers avec une durée de vie de > 1 500 m dans le forage de roches dures, ce qui est 50 % supérieur au YG6 traditionnel.

Excellentes performances anti-fatigue

améliore la durée de vie en fatigue ($> 10^5$ fois) en réduisant l'initiation des fissures de surface (longueur de fissure $< 0,05$ mm) et le taux de croissance des fissures internes ($da/dN < 10^{-7}$ mm/cycle).

Par exemple, la durée de vie du WC-10Co à gradient sous charge cyclique (rapport de contrainte $R = 0,1$, fréquence 5-15 Hz) est de 20 à 30 % supérieure à celle du YG10 traditionnel (Co 10 %).

Résistance aux chocs thermiques

La structure à gradient réduit la concentration de contrainte thermique (< 80 MPa) et améliore la résistance aux chocs thermiques de 15 à 20 % dans des conditions de température élevée ($> 800^\circ\text{C}$), ce qui la rend adaptée aux outils aéronautiques (température de coupe $> 800^\circ\text{C}$).

Résistance à la corrosion

La faible teneur en Co de la surface réduit la sensibilité à la corrosion (taux de dissolution $< 10^{-10}$ g/cm² · s) et améliore la résistance à la corrosion de 10 à 15 % dans les environnements acides (pH < 5), ce qui le rend adapté aux applications d'ingénierie marine.

S'adapter aux conditions de travail difficiles

Sous haute température ($> 800^\circ\text{C}$), chocs violents (> 500 Hz), contraintes élevées (> 80 MPa) et environnement corrosif (concentration en NaCl 3,5 %), la structure à gradient peut prolonger efficacement la durée de vie. Par exemple, la durée de vie des forets en haute mer est augmentée de 50 % et celle des moules de plaquettes de frein pour trains à grande vitesse de 60 %.

Défis de la structure à gradient du carbure cimenté par rapport aux nuances de carbure cimenté traditionnelles

L'introduction du carbure cimenté à structure à gradient a apporté de nombreux défis aux nuances de carbure cimenté traditionnelles (telles que les séries YG et YT) :

Des limites de performances révélées

Les nuances traditionnelles ont une structure uniforme et sont difficiles à satisfaire aux exigences de conditions de travail complexes. Par exemple, l'YG6 (Co 6 %) présente une dureté élevée (HV 1600), mais se brise facilement en cas de chocs importants (comme dans l'exploitation minière) ($K_{IC} < 10$ MPa·m^{1/2}) ; l'YG15 (Co 15 %) présente une bonne ténacité (K_{IC} c 14-16 MPa·m^{1/2}) , mais une dureté insuffisante (HV < 1300) et une faible résistance à l'usure.

Le carbure cimenté à structure à gradient dépasse les limites de performance des nuances traditionnelles en combinant une dureté superficielle élevée (HV 1700) et une ténacité interne élevée (K_{IC} c 14 MPa·m^{1/2}) . Par exemple, la durée de vie (> 15 heures) du WC-10Co à gradient dans les

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

outils aéronautiques est 25 % supérieure à celle du YG8.

Concurrence dans les domaines d'application

Les nuances traditionnelles conservent des avantages dans des domaines spécifiques (tels que les faibles impacts et les faibles frottements), comme le YG3 (Co 3 %) pour la coupe à faible charge. Cependant, le carbure cimenté à structure à gradient est plus compétitif dans les applications à forte charge et multifonctionnelles (comme l'aviation et les forages en haute mer). Par exemple, la distance de perçage du WC-10Co à gradient pour les forêts en haute mer (> 1 500 m) est largement supérieure à celle du YG8 (< 1 000 m).

Les marques traditionnelles doivent moderniser leurs formules ou introduire des structures de gradient pour maintenir leur compétitivité sur le marché, sinon elles risquent d'être progressivement éliminées du marché haut de gamme.

Complexité du processus de production

Le procédé de production des nuances traditionnelles est simple (rapport de poudre uniforme + frittage simple) et peu coûteux (environ 50 à 60 yuans/kg). Le carbure cimenté à structure à gradient nécessite un mélange de poudre en couches, un frittage à gradient et une surveillance en ligne, ce qui est complexe et augmente le coût de 15 à 20 % (environ 60 à 70 yuans/kg).

Les équipements de production traditionnels (tels que les fours de frittage ordinaires) peuvent difficilement répondre aux exigences de précision des structures à gradient (telles que l'écart de distribution du Co < 0,5 %) et doivent être mis à niveau vers des équipements de haute précision (tels que les fours de frittage à gradient avec une précision de contrôle du gradient de température de ± 2 °C/cm).

Le défi de la normalisation

Les nuances traditionnelles répondent à des normes éprouvées (telles que ISO K10, K20, P10), à des paramètres de performance clairs et sont faciles à produire et à appliquer en série. Les carbures cimentés à structure graduée présentent des performances qui varient avec la profondeur et sont difficiles à définir avec une norme unique. Il est donc nécessaire de mettre en place un nouveau système d'évaluation des performances (tel que des essais de dureté et de ténacité par couches).

K_{1c} 14 MPa·m^{1/2}) du WC-10Co ne peut pas être directement adapté à la norme ISO traditionnelle, ce qui peut entraîner une confusion pour les utilisateurs lors de la sélection des matériaux.

Acceptation et promotion du marché

Les nuances traditionnelles bénéficient d'une longue histoire et d'une forte reconnaissance sur le marché, et les utilisateurs connaissent leurs performances et leur champ d'application. En tant que technologie émergente, le carbure cimenté à structure à gradient doit gagner en confiance grâce à des vérifications d'application à long terme (comme les tests de durée de vie des outils aéronautiques).

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

Aux premiers stades de la promotion, les préoccupations des utilisateurs concernant le coût et la stabilité des performances doivent être prises en compte, par exemple en démontrant ses avantages au moyen de projets de démonstration (comme l'augmentation de la durée de vie des forets miniers de 50 %).

Adaptabilité de la chaîne d'approvisionnement et sélection des matériaux

La chaîne d'approvisionnement des nuances traditionnelles est mature, les matières premières (poudres de WC et de Co, par exemple) présentent des spécifications uniformes et les coûts d'approvisionnement sont faibles. Le carbure cémenté à structure graduée nécessite des poudres de spécifications variées (poudres de WC de différentes granulométries et teneurs en Co, par exemple), ce qui accroît la complexité et le coût de la chaîne d'approvisionnement.

Les utilisateurs doivent réévaluer leurs stratégies de sélection des matériaux. La méthode traditionnelle de sélection simple des nuances (par exemple, basée sur la dureté ou la teneur en cobalt) n'est plus applicable, et des tests de performance par couches et des analyses de simulation doivent être introduits.

Exigences relatives à l'agent d'IA de contrôle de conception de production intelligente

La production de carbure cémenté à structure à gradient impose des exigences plus élevées en matière de fabrication intelligente. L'agent IA de contrôle de conception de production intelligente doit posséder les fonctionnalités suivantes pour garantir une production efficace, précise et stable :

Prédiction et optimisation de la microstructure

Exigences de capacité : l'agent IA doit prédire l'impact de la teneur en Co, de la taille des grains et du rapport additif sur les performances grâce à des algorithmes d'apprentissage automatique (ML) et d'apprentissage profond (DL) (tels que la machine à vecteurs de support SVM, le réseau neuronal profond DNN) (précision de prédiction > 90 %).

Fonctions spécifiques

Sur la base de données historiques et de modèles physiques (tels que la relation Hall-Petch, le modèle Voigt), le gradient optimal de teneur en Co est prédit (par exemple, 4 % en surface, 8 % dans la couche intermédiaire et 12 % à l'intérieur, avec un écart de < 0,2 %).

La distribution granulométrique optimisée (0,5 μm en surface, 1 μm dans la couche intermédiaire, 1,5 μm à l'intérieur, avec un écart de < 0,02 μm) assure une amélioration synergique de la dureté (HV 1700) et de la ténacité (K_{IC} 14 $\text{MPa}\cdot\text{m}^{1/2}$).

Rapport d'additifs recommandé (tel que VC 0,4 %, TaC 0,2 %, Cr_3C_2 0,1 %, écart de rapport < 0,05 %) pour améliorer la cohérence des performances (écart < 0,5 %).

Simulez les performances en couches des structures à gradient (telles que la résistance à l'usure de surface et la résistance aux chocs internes) pour optimiser les solutions de conception.

Surveillance et contrôle des paramètres de processus en temps réel

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

Exigences en matière de compétences : L'agent IA doit combiner la technologie de l'Internet industriel des objets (IIoT) pour surveiller et contrôler les paramètres de production en temps réel (écart < 1 %) grâce à des capteurs intégrés et à l'informatique de pointe.

Fonctions spécifiques

Surveiller le rapport de poudre (précision de la teneur en Co $\pm 0,05$ %), la granulométrie (précision $\pm 0,005 \mu m$) et la distribution additive (écart < 0,1 %).

Réglage en temps réel des paramètres de frittage : température (1400-1500°C, précision $\pm 2^\circ C$), degré de vide ($< 10^{-2}$ Pa, précision $\pm 10^{-3}$ Pa), taux de diffusion du Co ($< 10^{-9} cm^2/s$, écart < 5%).

Contrôler la vitesse de refroidissement (3-5°C/min, écart < 0,2°C/min) pour éviter les contraintes thermiques (< 100 MPa) et les microfissures (taux < 0,5 %).

Surveiller la résistance de la liaison intercouche (> 50 MPa) et éviter les défauts de délaminage (longueur de fissure > 0,05 mm).

Prévision des pannes et contrôle qualité

Exigences de capacité : l'agent IA doit prédire les risques potentiels de défaillance dans le processus de production (tels que la ségrégation du Co, la croissance anormale des grains) via des réseaux neuronaux (tels que RNN, LSTM) et intervenir à l'avance (temps d'avance de prédiction > 10^3 fois).

Fonctions spécifiques

μm) causée par l'écart de distribution du Co (> 1 %) a été prédit et le temps de frittage a été ajusté à l'avance (1 à 3 heures, écart < 0,1 heure).

une croissance anormale des grains (> $2 \mu m$) a été identifiée et la croissance a été inhibée en ajustant la quantité d'ajout de VC (0,2 % à 0,5 %).

En combinant des capteurs d'émission acoustique (précision de fréquence ± 2 kHz) et un scanner CT (précision $\pm 0,02$ mm), les microfissures (longueur > 0,05 mm) peuvent être détectées en temps réel, réduisant ainsi le taux de défaillance (< 0,1%).

Détecter la concentration de contrainte interlaminaire ($K_t > 1,5$) et éviter le pelage de l'interface (profondeur > $5 \mu m$).

Optimisation des processus et prise de décision intelligente

Exigences en matière de compétences : l'agent IA doit optimiser les paramètres du processus de production via des algorithmes génétiques (GA) ou un apprentissage par renforcement (RL) pour améliorer l'efficacité de la production (augmentation de 15 à 20 %) et la cohérence des performances (écart < 2 %).

Fonctions spécifiques

Le rapport de poudre en couches a été optimisé (surface Co 4 %, couche intermédiaire 8 %, couche intérieure 12 %, écart < 0,1 %) pour assurer l'uniformité de la structure du gradient.

Le gradient de température de frittage a été ajusté (1400°C pour la surface, 1420°C pour la couche intermédiaire et 1450°C pour la couche interne, avec un écart de $\leq \pm 2^\circ C/cm$) pour contrôler la diffusion du Co et la croissance des grains.

Optimiser le rapport additif (VC : TaC:Cr₃C₂ = 2 : 1:0,5, écart < 0,05 %) pour améliorer la dureté et la ténacité (HV 1700, K_{IC} 14 MPa·m^{1/2}).

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

Grâce à l'analyse des données de processus, le temps de broyage à billes (20 à 40 heures, précision de $\pm 0,5$ heure) et la vitesse de rotation (300 à 500 tr/min, précision de ± 5 tr/min) sont automatiquement ajustés pour améliorer l'efficacité de la production.

Intégration de données et collaboration multi-sources

Exigences de capacité : l'agent IA doit intégrer des données multi-sources (caractéristiques de la poudre, paramètres de frittage, résultats des tests de performance) et réaliser une collaboration multi-appareils via un réseau 5G et une plate-forme cloud (délai < 10 ms).

Fonctions spécifiques

Intégrer les données de taille de particules de poudre (analyse de la taille des particules au laser, écart $< 0,02 \mu m$), les données de température de frittage (précision du capteur $\pm 2^\circ C$) et les données de test de performance (écart de dureté $< 2\%$).

analyse des données pour optimiser les paramètres de production (par exemple, le taux de diffusion du Co est contrôlé à $< 10^{-9} cm^2/s$).

Contrôle coordonné du broyeur à boulets (précision de la vitesse ± 5 tr/min), du four de frittage (écart de température $\leq \pm 2^\circ C$) et de l'équipement de détection (écart de largeur de pic XRD $< 0,2^\circ$).

Réaliser une collaboration inter-lignes, comme par exemple ajuster de manière synchrone les gradients de température de plusieurs fours de frittage (écart $\leq \pm 1^\circ C/cm$).

Maintenance intelligente et réglage adaptatif

Exigences en matière de compétences : l'agent IA doit prédire le temps de défaillance des équipements et des produits grâce aux données de croissance des fissures (erreur < 5 heures) et optimiser les stratégies de maintenance (réduction des temps d'arrêt de 30 à 35 %).

Fonctions spécifiques

Prédire la ségrégation de Co (écart $> 1\%$) causée par l'écart de température du four de frittage ($> \pm 10^\circ C$) et ajuster les paramètres à l'avance.

En combinant les données d'émission acoustique et de tomodensitométrie, la rupture par fatigue du carbure cémenté à structure à gradient en service est prédite ($> 10^4$ fois à l'avance) et le cycle de maintenance est optimisé.

Ajustez de manière adaptative les paramètres de production, tels que l'ajustement de l'ajout de VC (augmentation de 0,1 % à 0,2 %) en fonction des données de dureté en temps réel (écart HV $> 2\%$). Prévoyez l'usure de l'équipement (par exemple, durée de vie du roulement du broyeur à boulets, erreur < 10 heures), remplacez les pièces à l'avance et réduisez les temps d'arrêt.

Personnalisation de la demande des utilisateurs et apprentissage par rétroaction

Exigences de capacité : l'agent IA doit personnaliser la conception de la structure du gradient en fonction des besoins de l'utilisateur (tels que la dureté élevée des outils de coupe de l'aviation et la ténacité élevée des forêts minières) et optimiser en permanence grâce à l'apprentissage par rétroaction (amélioration des performances de 5 à 10 %).

Fonctions spécifiques

Conformément aux exigences des outils aéronautiques (dureté HV >1700), une structure à gradient

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

avec une surface Co 4% et une granulométrie de 0,5 μm a été conçue.

Conformément aux exigences des forets miniers ($K_{1c} > 14 \text{ MPa} \cdot \text{m}^{1/2}$), la structure interne Co 12% et la granulométrie 1,5 μm sont conçues.

Collectez des données de retour d'application (telles que la durée de vie de l'outil, le taux d'usure du foret) et optimisez la teneur en Co et la distribution des grains grâce à l'apprentissage par renforcement (erreur $< 0,1 \%$).

Selon les conditions de travail de l'utilisateur (telles que température élevée $> 800^\circ\text{C}$), une solution de revêtement de surface (telle que CrN, épaisseur 3 μm) est recommandée.

Adaptation environnementale et optimisation de la consommation énergétique

Exigences en matière de compétences : l'agent IA doit optimiser les paramètres du processus et réduire la consommation d'énergie (de 10 à 15 %) en fonction de l'environnement de production (comme la température et l'humidité) et des exigences de consommation d'énergie.

Fonctions spécifiques

Surveiller l'humidité ambiante ($< 50 \%$) pour éviter les effets corrosifs ($< 5 \%$ d'augmentation du taux d'usure).

Optimisez la consommation énergétique du four de frittage (précision du contrôle de la température $\pm 2^\circ\text{C}$) et réduisez le temps de chauffage inefficace (économie de 5% à 10%).

Ajustez de manière adaptative la puissance de fonctionnement de l'équipement en fonction de la taille du lot de production (par exemple, réduisez la vitesse du broyeur à boulets à 300 tr/min pour la production de petits lots).

Facteurs influant sur la structure à gradient du carbure cémenté

Les performances et la production de structures à gradient sont affectées par les facteurs suivants :

Co-distribution de contenu

Le gradient de teneur en Co doit être maintenu dans une plage raisonnable (4 à 6 % en surface, 8 à 10 % dans la couche intermédiaire et 12 à 15 % à l'intérieur). Si la teneur en Co en surface est inférieure à 4 %, K_{1c} est inférieur à $8 \text{ MPa} \cdot \text{m}^{1/2}$; si la teneur en Co interne est supérieure à 15 %, la dureté est inférieure à 1200.

Répartition granulométrique

La granulométrie superficielle est inférieure à 0,5 μm , celle de la couche intermédiaire entre 0,5 et 1 μm et celle de la couche interne entre 1 et 2 μm . Si la granulométrie superficielle est supérieure à 1 μm , la dureté est inférieure à 1 500. Si la granulométrie interne est inférieure à 0,5 μm , $K_{1c} < 10 \text{ MPa} \cdot \text{m}^{1/2}$.

Procédé de frittage

Un écart de température ($> \pm 10^\circ\text{C}$) ou un vide insuffisant ($> 10^{-2} \text{ Pa}$) peut entraîner une distribution inégale du Co (écart $> 1\%$), la formation de flaques de Co (taille $> 5 \mu\text{m}$) et une diminution de 10 à 15% de la ténacité.

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

additif

Un VC excessif ($> 0,8 \%$) entraînera un rapport de phase fragile de $> 0,5 \%$, réduisant K_{1c} ; un TaC insuffisant ($< 0,1 \%$) entraînera une faible résistance aux joints de grains ($< 100 \text{ MPa}$).

Précision de l'équipement

Une précision insuffisante de la vitesse du broyeur à boulets ($< \pm 5 \text{ tr/min}$) et de la température du four de frittage ($< \pm 2^\circ\text{C}$) peut entraîner un écart de taille des grains ($> 0,02 \mu\text{m}$) et une distribution inégale du Co (écart $> 0,5\%$).

Facteurs environnementaux

L'humidité de l'environnement de production ($> 80 \%$) peut provoquer une oxydation de la poudre (teneur en $\text{O}_2 > 0,5 \text{ ppm}$) et affecter la stabilité de la structure du gradient (écart de dureté $> 2 \%$).

Application technique du carbure cimenté à structure à gradient

Le carbure cimenté à structure à gradient fonctionne bien dans une variété de scénarios exigeants :
Outils d'aviation

Surface Co 4%, dureté HV 1700, Co interne 12%, K_{1c} 14 $\text{MPa} \cdot \text{m}^{1/2}$, en coupe à grande vitesse ($> 800 \text{ m/min}$), durée de vie > 15 heures, soit une augmentation de 25%, meilleure que le YG8 traditionnel.

Trépan de forage minier

La granulométrie de surface est de $0,5 \mu\text{m}$, la teneur interne en Co est de 12 % et la durée de vie dans le forage de roche dure est $> 1500 \text{ m}$, soit une augmentation de 50 %, surpassant le YG6 traditionnel.

Forage en haute mer

Structure à gradient (Co de surface 4%, couche intermédiaire 8%, couche interne 12%), en impact en haute mer ($> 500 \text{ Hz}$, pression $> 80 \text{ MPa}$), K_{1c} atteint 14 $\text{MPa} \cdot \text{m}^{1/2}$, distance de forage $> 1500 \text{ m}$.

Moule de plaquette de frein pour train à grande vitesse

Dureté superficielle HV 1700, K_{1c} interne 14 $\text{MPa} \cdot \text{m}^{1/2}$, durée de vie $> 4 \times 10^5$ fois en frottement à haute température ($> 600^\circ\text{C}$), soit une augmentation de 60%.

Électrolyseur à nouvelle énergie

Ajout de surface de TiC 5%, dureté HV 1800, Co interne 12%, K_{1c} 13 $\text{MPa} \cdot \text{m}^{1/2}$, en choc électrochimique ($> 10^3$ fois), durée de vie $> 10^3$ heures, soit une augmentation de 40%.

Moule pour pales d'éolienne

Surface Co 4%, revêtement CrN $3 \mu\text{m}$, interne Co 12%, en impact à basse température (-60°C , vitesse de déformation $> 10^3 \text{ s}^{-1}$), énergie d'impact $> 12 \text{ J}$, durée de vie $> 10^6$ fois, soit une augmentation de 40%.

Avantages et inconvénients du carbure cimenté à structure à gradient

Avantages :

La dureté et la ténacité sont optimisées de manière synergique, avec d'excellentes performances globales, surpassant les qualités traditionnelles.

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

S'adapte à une variété de conditions de travail difficiles et prolonge la durée de vie.

La production intelligente améliore la cohérence et l'efficacité.

Inconvénients :

Le processus de préparation est complexe et nécessite un équipement de haute précision (tel qu'un four de frittage à gradient avec une précision de contrôle du gradient de température de $\pm 2^{\circ}\text{C}/\text{cm}$).

Coût plus élevé (15 à 20 % plus élevé que les grades traditionnels).

L'agent IA a des exigences élevées en matière d'intelligence et a besoin d'une grande quantité de données de support.

Tendance de développement du carbure cimenté à structure à gradient

Avec le développement approfondi de la fabrication intelligente, la production et l'application du carbure cimenté à structure à gradient deviendront plus intelligentes :

Intégration profonde de l'IA et de l'IIoT

Grâce à l'apprentissage par renforcement et à l'analyse des mégadonnées, AI Agent optimise la conception de la structure du gradient (erreur de distribution $\text{Co} < 0,1 \%$) et améliore la cohérence des performances (écart $< 0,5 \%$).

L'IIoT utilise les réseaux 5G et les plateformes cloud pour réaliser une collaboration multi-appareils (délai $< 10 \text{ ms}$) et améliorer l'efficacité de la production ($> 20 \%$).

Application de la technologie d'impression 3D

La technologie d'impression 3D (telle que la fusion laser sélective SLM) est utilisée pour obtenir des structures de gradient plus complexes (telles que des gradients multicouches et multiphasés), avec un écart de taille de grain $< 0,01 \mu\text{m}$ et un écart de distribution de $\text{Co} < 0,1 \%$.

Nouvelle structure de gradient

Développer des gradients multiphasés (tels que les gradients composites WC- TiC -Co) et des gradients multifonctionnels (tels que la résistance à la corrosion de surface et la ténacité interne élevée) pour répondre aux divers besoins de l'aviation, des grands fonds, des nouvelles énergies et d'autres domaines.

Normalisation et promotion

Établir des normes d'évaluation des performances pour le carbure cimenté à structure à gradient (telles que les tests de dureté et de ténacité en couches) afin de promouvoir son application généralisée sur le marché mondial.

Fabrication verte

Utiliser l'IA pour optimiser la consommation d'énergie (réduire de 10 à 15 %) et développer une structure de gradient recyclable en carbure cimenté (comme le recyclage stratifié à teneur en Co) pour parvenir à un développement durable.

En résumé, le carbure cimenté à structure à gradient améliore la dureté, la ténacité et la résistance

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

à l'usure grâce à la conception à gradient de la microstructure, repoussant ainsi les limites de performance des nuances de carbure cimenté traditionnelles. L'introduction d'un agent IA de contrôle de conception de production intelligent améliore encore la précision et l'efficacité de la production, favorise le développement du carbure cimenté vers des performances et une intelligence élevées, et offre des solutions plus efficaces et plus fiables pour l'aviation, l'exploitation minière, les nouvelles énergies et d'autres secteurs.

appendice:

Différents concepts et fonctions de la carburation au carbure cimenté

La technologie de cémentation du carbure cimenté (WC-Co) consiste à introduire des éléments carbonés à la surface du matériau par traitement thermochimique à haute température afin d'en améliorer les propriétés. L'application de la cémentation au carbure cimenté vise principalement à améliorer la dureté, la résistance à l'usure, la résistance à la corrosion et la résistance à la fatigue, tout en préservant la ténacité interne. Cet article aborde la nature de la cémentation, son mode d'exécution, son mécanisme d'action, ses principaux facteurs d'influence et ses effets concrets, afin de révéler son intérêt unique pour l'optimisation des performances du carbure cimenté.

L'essence de la carburation : diffusion superficielle et réaction du carbone

Le cœur de la carburation réside dans la diffusion et la réaction des atomes de carbone à haute température. Le carbure cimenté est composé d'une phase dure de carbure de tungstène (WC) et d'une phase de liaison de cobalt (Co). La phase Co présente une solubilité élevée du carbone (environ 0,2 à 0,3 % en poids à 900 °C), qui devient le principal canal de diffusion du carbone. Au cours du processus de carburation, les atomes de carbone sont décomposés à partir de sources de carbone externes (telles que CH₄, CO ou poudre de carbone solide), diffusent vers la surface à travers le réseau de la phase Co, puis réagissent avec le WC pour former une structure de carbure plus dense ou épaissir les particules de WC existantes. Ce mécanisme de diffusion-réaction forme une zone riche en carbone à la surface, se manifestant généralement par une couche riche en WC d'une épaisseur de 10 à 50 µm.

La température de cémentation est généralement comprise entre 850 et 950 °C, ce qui est inférieur à la température de frittage du carbure cimenté (1 400 à 1 500 °C) afin d'éviter le grossissement des grains ou la dégradation des performances de la matrice. La vitesse de diffusion du carbone (~ 10⁻¹¹ cm²/s) détermine l'épaisseur et la qualité de la couche cimentée et doit être contrôlée avec précision par la température, le potentiel carbone et le temps.

Procédé de cémentation : du traditionnel au moderne

Le processus de cémentation prend différentes formes selon la source de carbone et le mode d'approvisionnement énergétique. Chaque forme a des applications et des effets différents sur le carbure cimenté :

Cémentation gazeuse :

Utilisant des hydrocarbures (tels que CH₄) ou du monoxyde de carbone (CO) comme source de carbone, elle est réalisée dans une atmosphère contrôlée à 850-950°C. CH₄ se décompose en atomes de carbone actifs (C) et H₂, et les atomes de carbone diffusent vers la surface : CH₄ → C + 2H₂. La cémentation gazeuse convient à la production de masse, avec une épaisseur de couche cimentée uniforme (10-30 µm) et une dureté jusqu'à HV 2000-2200, mais le potentiel carbone (0,8-1,2 % en poids) doit être contrôlé avec précision pour éviter une surcarburation ou une décarburation.

Cémentation solide :

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

l'échantillon de carbure est noyé dans de la poudre de carbone (comme du graphite), chauffé à 900-950 °C, et le carbone se diffuse par contact direct. L'équipement de cémentation solide est simple et adapté aux expériences à petite échelle, mais l'uniformité de la couche cimentée est médiocre (écart d'épaisseur de $\pm 5 \mu\text{m}$) et son efficacité est faible.

Cémentation plasma :

Dans un environnement plasma à 700-900 °C, un champ électrique est utilisé pour activer une source de carbone (telle que CH_4) afin de générer des ions carbone hautement actifs. Le plasma accélère la diffusion du carbone (vitesse portée à environ $10^{-10}\text{cm}^2/\text{s}$), formant une couche cimentée de 20 à 40 μm à basse température avec une dureté de HV 2200-2500, tout en réduisant la consommation d'énergie (environ 20 à 30 %).

Cémentation assistée par laser :

utilisation d'un laser (puissance de 1 à 2 kW) pour chauffer localement la surface, combiné à une source de carbone (comme un revêtement en poudre de carbone) pour réaliser la cémentation. La cémentation laser est rapide (< 1 heure), l'épaisseur de la couche cimentée est contrôlable (5 à 20 μm) et convient aux pièces géométriques complexes. Cependant, des microfissures peuvent apparaître dans la zone affectée thermiquement.

Ces procédés ont chacun leurs propres objectifs. La cémentation gazeuse est adaptée à la production industrielle, la cémentation plasma privilégie un rendement élevé et une faible consommation, et la cémentation laser est adaptée au renforcement local de haute précision.

Le rôle de la carburation : amélioration multidimensionnelle des performances

L'influence de la carburation sur les performances du carbure cimenté est multiforme, se reflétant principalement dans les effets clés suivants :

à l'usure améliorées :

La couche riche en WC (épaisseur 10-30 μm) formée par carburation augmente significativement la dureté de surface (HV 2 000-2 500), bien supérieure à celle de la matrice (HV 1 500-1 800). La couche de carbure haute dureté améliore la résistance à l'usure par abrasion et par glissement, et le taux d'usure peut être réduit à $< 0,08 \text{ mm}^3/\text{N} \cdot \text{m}$. Par exemple, dans les applications d'outils de coupe, les outils en carbure cimenté carburé peuvent supporter des vitesses de coupe plus élevées ($> 1\,000 \text{ m/min}$) et augmenter leur durée de vie de 20 à 30 %.

Résistance à la corrosion améliorée :

la couche riche en WC réduit l'exposition de la phase Co et améliore la stabilité de surface en milieu acide ($\text{pH} < 5$) ou oxydant ($> 600\text{ °C}$). Après cémentation, une fine couche de Co_3C ou de Co_2C peut se former à la surface de la phase Co, inhibant ainsi davantage la réaction de corrosion et prolongeant la durée de vie du matériau dans des conditions corrosives (comme les vannes en eaux profondes).

Résistance à la fatigue améliorée :

La contrainte de compression résiduelle ($> 400 \text{ MPa}$) introduite par la cémentation est générée par expansion volumique, ce qui inhibe efficacement l'apparition et la propagation de fissures

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

superficielles, et la durée de vie en fatigue peut être augmentée jusqu'à $> 10^5$ fois. La couche cémentée améliore considérablement la fiabilité, notamment dans les situations de chargement à cycles élevés (comme les outils aéronautiques).

Optimisation de la microstructure :

Pendant la carburation, les atomes de carbone sont intégrés dans le réseau WC ou dans les particules de carbure épaissies, la résistance de liaison des joints de grains est améliorée (> 150 MPa) et la tendance à la fracture intergranulaire est réduite. L'analyse SEM montre que la surface de fracture après carburation est principalement composée de petites fossettes ($< 1 \mu m$), indiquant que la proportion de fracture plastique a augmenté.

Stabilité thermique améliorée : la

couche carburée améliore la résistance de la surface au ramollissement à haute température et peut maintenir une dureté élevée (> 1800 HV) à $600-800^\circ C$, ce qui la rend adaptée aux applications de découpe ou d'emboutissage à haute température.

Il convient de noter que la cémentation n'a pas d'effet positif sur toutes les propriétés. Une couche cémentée trop épaisse ($> 50 \mu m$) peut augmenter la fragilité de surface et réduire la ténacité à la rupture (K_{Ic}) de 5 à 10 %. Une optimisation du procédé est nécessaire pour équilibrer dureté et ténacité.

Facteurs d'influence clés : points de contrôle essentiels pour l'optimisation des performances

L'effet de cémentation est influencé par les effets combinés des paramètres du procédé, des propriétés des matériaux et des conditions externes. Les facteurs clés sont les suivants :

Température et durée :

La température optimale est de 850 à $950^\circ C$, et l'épaisseur de la couche carburée augmente linéairement avec le temps (2 à 10 heures) (épaisseur de 10 à $50 \mu m$). Une température trop élevée ($> 1000^\circ C$) provoque un ramollissement de la phase Co ou un grossissement des grains ($> 2 \mu m$), et la dureté diminue de 15 à 20% . Une durée trop longue (> 12 heures) peut provoquer une décarburation interne et affecter les performances de la matrice.

Contrôle du potentiel carbone :

Le potentiel carbone (teneur en carbone) doit être maintenu entre $0,8$ et $1,2\%$ en poids. Un potentiel trop faible ($< 0,6\%$ en poids) entraîne une couche carburée incomplète et une dureté insuffisante. Un potentiel trop élevé ($> 1,5\%$ en poids) entraîne la formation d'une couche de carbone (comme du carbone libre), augmentant la fragilité.

Microstructure du matériau :

Teneur en Co : Une teneur en Co de 8 à 12% offre le meilleur canal de diffusion du carbone. Une teneur trop faible ($< 6\%$) limite la diffusion du carbone, tandis qu'une teneur trop élevée ($> 15\%$) provoque un ramollissement de la surface.

Taille des grains WC : Lorsque la taille des grains est $< 0,5 \mu m$, la force de liaison de la couche carburée est forte et la dureté augmente considérablement ; lorsque la taille des grains est $> 2 \mu m$, la diffusion du carbone est inégale et la dureté augmente de $< 10\%$.

État de surface :

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

La rugosité initiale $Ra < 0,1 \mu m$ assure une adhérence étroite de la couche carburée ; si $> 0,2 \mu m$, des défauts peuvent apparaître dans la couche carburée et le taux d' usure augmentera de 15 à 20 %.

Conditions de post-traitement :

Un revenu à basse température (200-400°C, 1-2 heures) après cémentation peut libérer les contraintes résiduelles ($< 100 \text{ MPa}$), mais si la température est trop élevée ($> 500^\circ\text{C}$), la dureté de la couche cémentée diminuera.

Effets d'application pratique : du laboratoire à la pratique de l'ingénierie

L'application de la technologie de carburation dans le domaine du carbure cémenté est relativement mature et son effet réel a été vérifié dans de nombreux scénarios d'ingénierie :

Outils de coupe :

Les outils WC-10Co sont cémentés (couche cémentée de $20 \mu m$, dureté HV 2000). En coupe à grande vitesse ($> 1000 \text{ m/min}$), la durée de vie est augmentée de 25 % et l'efficacité de coupe de 20 %. Ils sont adaptés à l'usinage des alliages d'aluminium aéronautique.

Foret minier : Après la cémentation du

foret WC-8Co (couche de cémentation de $15 \mu m$) , le taux d'usure est réduit à $< 0,08 \text{ mm}^3 / \text{N} \cdot \text{m}$, la distance de forage est étendue à $> 1500 \text{ m}$, l'efficacité est augmentée de 50 % et le coût d'exploitation minière est considérablement réduit.

Matrice d'emboutissage :

cémentation de matrice WC-12Co (couche de cémentation $30 \mu m$, dureté > 2200), temps d'extrusion $> 10^6$ fois, augmentés de 25 %, pour répondre aux besoins d'emboutissage à haute fréquence.

Équipements en eaux profondes : La durée de vie des

vannes en eaux profondes WC-10Co (couche de perméation de $25 \mu m$) est prolongée à > 4 ans en haute pression ($> 80 \text{ MPa}$) et en environnement corrosif ($\text{pH} < 5$), soit une augmentation de 40 %, montrant une excellente résistance à la corrosion.

Limites et axes d'amélioration de la technologie de cémentation

Bien que la technologie de carburation ait considérablement amélioré les performances du carbure cémenté, elle présente toujours les limites suivantes :

Risque de fragilité : Une couche carburée trop épaisse ($> 50 \mu m$) peut provoquer une fragilisation de surface, réduisant K_{Ic} de 5 à 10 %, limitant les applications de chargement dynamique.

Complexité du procédé : Le contrôle du potentiel carbone est difficile, nécessitant des équipements de haute précision (écart de température $\pm 5^\circ\text{C}$), ce qui augmente les coûts de production (environ 15%-20%).

Limitation de profondeur : la profondeur de carburation est généralement $< 50 \mu m$, ce qui ne peut pas répondre aux exigences de renforcement en profondeur.

Les améliorations comprennent :

Renforcement composite : Combinaison de la technologie de carburation et de revêtement (comme le revêtement TiN) pour former une structure à gradient et améliorer les performances des couches profondes.

Contrôle intelligent : Développer un système de carburation intelligent pour surveiller le potentiel

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

de carbone et l'épaisseur de la couche de carburation en temps réel grâce à des capteurs pour améliorer la stabilité du processus.

Sources de carbone à faible coût : explorez les sources de carbone issues du biochar ou de la récupération des gaz résiduels pour réduire les coûts et améliorer la durabilité.

Grâce à la diffusion et à la réaction en surface des éléments carbonés, la technologie de cémentation au carbure cimenté forme une couche enrichie en WC de haute dureté, améliorant significativement la dureté, la résistance à l'usure, la résistance à la corrosion et la résistance à la fatigue. Différents procédés (tels que la cémentation gazeuse et la cémentation plasma) offrent diverses applications, et leurs effets sont optimisés par la régulation de la température, du potentiel carbone et de la microstructure. Malgré les défis liés à la fragilité et au coût, la technologie de cémentation a démontré un grand potentiel pour les outils de coupe, les équipements miniers et les équipements sous-marins, et devrait permettre de dépasser encore les limites à l'avenir grâce au renforcement des composites et à un développement intelligent.

Tableau comparatif des différents concepts et fonctions de la carburation au carbure cimenté

projet	Carburation involontaire (mauvais contrôle du carbone pendant la production)	Procédé de cémentation (processus d'amélioration des performances des alliages durs)
Définition et essence	En raison du potentiel de carbone incontrôlé ou des fluctuations de la teneur en carbone des matières premières pendant le processus de production (comme le frittage), les atomes de carbone diffusent accidentellement vers la surface pour former une couche carburée inattendue.	Le processus de traitement thermochimique à haute température introduit des éléments de carbone dans la surface du carbure cimenté pour optimiser les performances en contrôlant avec précision la source de carbone, la température et le temps.
Formulaire de processus	- Se produit dans les liaisons de production telles que le frittage, sans contrôle de processus spécifique. - Source de carbone : excès de carbone dans l'atmosphère (comme la décomposition du CH ₄) . - Température : température de frittage (1300-1500°C).	- Cémentation gazeuse : CH ₄ ou CO, 850-950°C. - Cémentation solide : Contact poudre de carbone, 900-950° C. - Cémentation plasma : Activation plasma CH ₄ , 700-900°C. - Cémentation assistée par laser : Chauffage laser, puissance 1-2 kW.
Caractéristiques de la couche perméable	- Epaisseur : 5-60 μ m , non uniforme. - Dureté : HV 1800-2200, grandes fluctuations (écart ±200 HV). - Peut être accompagné de carbone libre ou de décarburation.	- Épaisseur : 10-30 μ m , uniforme. - Dureté : HV 2000-2500, stable (écart < ±50 HV). - La couche riche en WC est dense.
Dureté et résistance à l'usure	- Dureté augmentée à HV 1800-2200, mais répartition inégale. - Résistance à l'usure améliorée, taux d'usure < 0,1 mm ³ / N · m , mais une surcarbonisation locale réduit l'effet.	- Dureté augmentée à HV 2000-2500, uniforme. - Résistance à l'usure considérablement améliorée, taux d'usure < 0,08 mm ³ / N · m, adapté aux scénarios de frottement à forte charge.
Résistance à la corrosion	- La couche carburée est inégale, la surcarburation locale forme du carbone libre, qui est facilement	- La couche riche en WC réduit l'exposition de la phase Co, améliore la résistance à la corrosion et convient aux

projet	Carburation involontaire (mauvais contrôle du carbone pendant la production)	Procédé de cémentation (processus d'amélioration des performances des alliages durs)
	soluble, la phase Co est plus exposée et la résistance à la corrosion diminue (comme dans un environnement pH <5).	environnements acides (pH < 5) ou oxydants à haute température (> 600 °C).
Performance anti-fatigue	- Une contrainte résiduelle inégale (localement < 200 MPa) peut introduire des microfissures et réduire la durée de vie en fatigue (< 10 ⁴ fois).	- Contrainte de compression résiduelle > 400 MPa, durée de vie en fatigue augmentée à > 10 ⁵ fois, adaptée aux scénarios de chargement à cycles élevés.
Microstructure	- La résistance de liaison des joints de grains est inégale (localement <100 MPa), la proportion de fractures intergranulaires est élevée (>50%) et la stabilité structurelle est faible.	- La résistance de liaison des joints de grains est améliorée (> 150 MPa), la fracture est principalement des fossettes (< 1 μm), la plasticité et la fragilité sont équilibrées et la structure est stable.
Stabilité thermique	- Une surcarburisation locale entraîne une stabilité thermique inégale et une baisse significative de la dureté (<1500 HV) à haute température (>600°C).	- La couche carburée maintient une dureté de >1800 HV à 600-800°C, adaptée aux applications de découpe ou d'emboutissage à haute température.
Ténacité à la rupture (K _{1c})	- Une couche carburée trop épaisse (>50 μm) ou trop importante conduit à une fragilité accrue et à une diminution de K _{1c} de 10%-20% (<10 MPa·m ^{1/2}).	- Les couches moyennement carburées (<30 μm) sont saturées en carbone par la phase Co, augmentant K _{1c} de 5%-10% (10-14 MPa·m ^{1/2}).
Température et temps	- Température : 1300-1500°C (température de frittage), le temps est incontrôlable et peut être trop long (>10 heures), entraînant une surcarburisation ou une décarburation.	- Température : 850-950°C, temps 2-10 heures, épaisseur de la couche de diffusion 10-50 μm, contrôle précis.
Potentiel carbone	- Potentiel de carbone non contrôlé (> 1,5 % en poids ou < 0,6 % en poids), entraînant des boîtiers incomplets ou surcarburés.	- Potentiel carbone 0,8-1,2 % en poids, régulé avec précision par un régulateur de débit massique pour assurer une couche de carburation uniforme.
Contenu Co	- Les fluctuations de la teneur en Co affectent la diffusion du carbone, < 6 % entraînent une diffusion restreinte, > 15 % entraînent un ramollissement.	- 8%-12% offre le meilleur canal de diffusion, avec un équilibre entre ténacité et dureté.
Granulométrie du WC	- Lorsque la taille des grains est > 2 μm, la diffusion du carbone est inégale et les performances fluctuent considérablement.	- Lorsque la granulométrie est < 0,5 μm, la force de liaison de la couche carburée est forte et la dureté augmente considérablement (> 10 %).
État de surface	- L'état de surface n'est pas contrôlé, Ra fluctue fortement, ce qui peut affecter l'adhérence de la couche carburée.	- Le polissage à Ra < 0,1 μm assure une adhérence étroite de la couche carburée et réduit le taux d'usure de 15 à 20 %.
Contrôlabilité et répétabilité	- Différences de performances importantes et incontrôlables entre les lots (écart > 20%).	- Contrôlable, écart de lot < 5 %, performances stables.
Cas positif	- Non applicable, généralement considéré comme un défaut de fabrication.	- Trépans miniers : WC-8Co (couche d'infiltration de 15 μm), distance de forage > 1500 m, augmentée de 50 %. - Matrices d'emboutissage : WC-12Co (couche d'infiltration de 30 μm),

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

Copyright© 2024 CTIA All Rights Reserved
标准文件版本号 CTIAQCD-MA-E/P 2024 版
www.ctia.com.cn

电话/TEL: 0086 592 512 9696
CTIAQCD-MA-E/P 2018-2024V
sales@chinatungsten.com

projet	Carburation involontaire (mauvais contrôle du carbone pendant la production)	Procédé de cémentation (processus d'amélioration des performances des alliages durs)
		temps d'extrusion > 10 ⁶ fois, augmentés de 25 %. - Équipements sous-marins : WC-10Co (couche d'infiltration de 25 μm), durée de vie > 4 ans, augmentée de 40 %.
Cas négatifs	- Un lot de forets WC-10Co avait un potentiel de carbone élevé (> 1,5 % en poids), une couche carburée de 60 μm , un K _{1c} < 10 MPa · m ^{1/2} et une fracture prématurée (durée de vie < 10 ⁴ fois) .	- Non applicable, le procédé de carburation peut éviter ce problème.
Orientation d'amélioration	- Optimiser la teneur en carbone des matières premières (écart < 0,1 % en poids), améliorer le contrôle de l'atmosphère et réduire la carburation involontaire.	-Le système de carburation intelligent surveille le potentiel de carbone en temps réel et combine la technologie de revêtement pour former une structure à gradient afin d'améliorer les performances des couches profondes.

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

appendice:

Cémentation et décarburation du carbure cémenté

Le carbure cémenté (principalement composé de carbure de tungstène WC et de phases de liaison telles que Co et Ni, avec une teneur en WC de 85-94 % en poids et une phase de liaison de 6-15 % en poids) est largement utilisé dans les pics, outils, joints et moules miniers en raison de sa dureté élevée (1400-2200 HV), de sa résistance élevée (1,8-2,8 GPa) et de son excellente résistance à l'usure. La carburation et la décarburation sont deux processus clés impliquant la régulation de la teneur en carbone dans la préparation et l'utilisation du carbure cémenté, qui affectent directement la microstructure, les performances et la durée de vie du matériau. La carburation introduit du carbone à la surface du carbure cémenté pour améliorer la dureté de surface, la résistance à l'usure et la résistance à la corrosion ; la décarburation entraîne une dégradation des performances en raison de la perte de carbone et est souvent évitée.

Cet article combine les normes nationales (telles que GB/T 18376-2014, GB/T 5169-2013) avec les pratiques de l'industrie, élabore le mécanisme de carburation et de décarburation, le processus, l'influence et les mesures de contrôle du carbure cémenté, et recommande modérément les capacités de CTIA GROUP LTD en matière d'optimisation du processus de carburation et de contrôle de la décarburation.

1. Cémentation du carbure cémenté

1.1 Définition et mécanisme de la carburation

La carburation est le processus de diffusion d'atomes de carbone dans le matériau à travers une atmosphère à haute température (comme C₂H₂, CH₄) ou une source de carbone solide (comme le graphite) sur la surface ou près de la surface du carbure cémenté pour former une phase à haute teneur en carbone (comme la phase WC ou η), améliorant ainsi la dureté de surface (augmentation de 10-20 %), la résistance à l'usure (perte d'usure réduite de 20-30 %) et la résistance à la corrosion (taux de corrosion < 0,01 mm/an).

Mécanisme de carburation :

Diffusion du carbone : Les atomes de carbone diffusent à travers les joints de grains de WC et la phase Co à haute température (1000-1200°C) avec un coefficient de diffusion $D \approx 10^{-12} - 10^{-11} \text{ m}^2/\text{s}$.

Formation de la phase carburée :

Zone à faible teneur en carbone : le carbone réagit avec le W pour former du WC (dureté 2000-2200 HV), améliorant ainsi la résistance à l'usure.

Région à haute teneur en carbone : l'excès de carbone peut former une phase η (comme Co₃W₃C, dureté > 2500 HV, fragilité élevée).

Modification de surface : La couche carburée (0,1-1 mm) forme une structure en gradient dont la

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

dureté varie de la surface (2000-2200 HV) au cœur (1400-1600 HV).

Objectif de carburation :

Améliore la dureté de surface (jusqu'à 1015%) et la résistance à l'usure (taux d'usure $< 0,05 \text{ mm}^3/\text{h}$, ASTM G65).

Résistance à la corrosion améliorée ($\text{H}_2\text{SO}_4/\text{H}_2\text{S} < 0,01 \text{ mm/an}$, NACE MR0175).

Performances de gradient de formage, équilibrant la résistance à l'usure de surface et la ténacité du noyau ($\text{KIC } 1215 \text{ MPa} \cdot \text{m}^{1/2}$).

1.2 Processus de carburation

Cémentation à la vapeur :

Introduisez un gaz source de carbone (tel que C_2H_2 , CH_4) dans un four à vide ou un four à atmosphère.

Équipement : Four de frittage sous vide ($10^{-2} \text{ à } 10^{-3} \text{ Pa}$, éléments chauffants en molybdène).

paramètre:

Température : $1000 \text{ à } 1200^\circ\text{C}$ (les grains de WC sont stables et la phase Co ne se liquéfie pas).

Gaz : C_2H_2 (pureté $> 99,9\%$), débit 510 L/min , pression $10^{-2} \text{ à } 10^{-3} \text{ Pa}$.

Temps : 13 heures (couche carburée $0,10,5 \text{ mm}$).

Atmosphère : H_2 (510 L/min , pour éviter l'oxydation), $\text{O}_2 < 5 \text{ ppm}$.

résultat:

Épaisseur de la couche carburée : $0,2\text{-}0,5 \text{ mm}$, dureté $2000\text{-}2200 \text{ HV}$.

Teneur en carbone : gain de surface $0,51\%$ en poids, granulométrie $0,52 \mu\text{m}$.

Porosité : $< 0,01\%$ (GB/T 51692013).

Application : Pics miniers (résistance à l'usure de surface augmentée de 20%), outils de coupe (durée de vie de coupe augmentée de 30%).

Cémentation en phase solide :

Méthode : Placez le carbure cémenté dans de la poudre de graphite ou du noir de carbone et chauffez-le à haute température.

Équipement : Four haute température (protection Ar, 10^{-2} Pa).

paramètre:

Température : $1100\text{-}1300^\circ\text{C}$.

Source de carbone : poudre de graphite ($D_{50} 15 \mu\text{m}$, pureté $> 99,9\%$), taux de remplissage $80\text{ à }90\%$.

Temps : 24 heures (couche carburée $0,51 \text{ mm}$).

Atmosphère : Ar (débit 5 L/min , $\text{O}_2 < 10 \text{ ppm}$).

résultat:

Épaisseur de la couche carburée : $0,51 \text{ mm}$, dureté $1900\text{ à }2100 \text{ HV}$.

Teneur en carbone : Augmentation de surface de $0,8 \text{ à } 1,5\%$ en poids, une phase η peut apparaître.

Adhérence : $> 80 \text{ N}$ (test de rayure).

Applications : Moules (résistance à l'usure augmentée de 20%), joints (résistance à la corrosion augmentée de 15%).

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

Cémentation plasma :

Méthode : La décharge plasma améliore l'activité des atomes de carbone et accélère leur diffusion.

Equipement : Four de cémentation plasma (décharge lumineuse, $10^{-1} 10^0$ Pa).

paramètre:

Température : 800-1000°C (basse température, protégeant le substrat).

Gaz : CH₄ (50%) + H₂ (50%), débit 1020 sccm .

Tension : 500800 V, densité de courant 12 mA/ cm² .

Temps : 12 heures (couche carburée 0,10,3 mm).

résultat:

Epaisseur de la couche carburée : 0,10,3 mm, dureté 21002300 HV.

Teneur en carbone : augmentation de surface de 0,3 à 0,8 % en poids , stabilité des grains.

Porosité : < 0,001 % (haute densité).

Applications : outils de précision (précision de coupe augmentée de 10 %), joints sous-marins (résistance H₂S < 0,005 mm/an).

1.3 Effet de la carburation

Avantages de la cémentation :

Dureté améliorée : Dureté de surface augmentée de 1015 % (20002200 HV), résistance à l'usure augmentée de 2030 % (perte par usure < 0,05 mm³/h).

Résistance à la corrosion améliorée : la couche carburée est dense et le taux de corrosion de H₂SO₄/H₂S est < 0,01 mm/an.

Durée de vie prolongée : La durée de vie du pic augmente de 3050 % (10001500 heures) et la durée de vie de coupe de l'outil augmente de 2030 %.

Inconvénients de la cémentation :

Risque de phase η : L'excès de carbone forme du Co₃W₃C (dureté > 2500 HV, KIC < 8 MPa·m^{1/2}), ce qui augmente la fragilité et la probabilité de fracture augmente de 1020 %.

Difficulté dans le contrôle du processus : un écart de teneur en carbone > $\pm 0,2$ % en poids peut entraîner des performances inégales.

Augmentation des coûts : équipement de cémentation (501 millions de yuans/unité) et coût du gaz (C₂H₂ 1020 yuans/m³) .

1.4 Cas de cémentation

Pic minier : WC+8%Co (Ø 20 mm), cémentation vapeur (1100°C, C₂H₂ 5 L/min, 2 heures), dureté superficielle 2100 HV, usure < 0,05 mm³/h, durée de vie 1200 heures (600 heures pour pic ordinaire).

Outil de coupe : WC+6%Co (Ø 12 mm), cémentation plasma (900°C, CH₄+H₂, 1,5 heures), couche cémentée 0,2 mm, dureté 2200 HV, durée de vie de l'alliage Ti augmentée de 30%.

Joint : YN10 (WC+10%Ni, Ø 50 mm), cémentation en phase solide (1200°C, poudre de graphite, 3 heures), taux de résistance à la corrosion H₂S < 0,005 mm/an, durée de vie > 1000 connexions.

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

2. Décarburation du carbure cémenté

2.1 Définition et mécanisme de la décarbonisation

La décarburation est le processus de frittage du carbure cémenté à haute température, de traitement thermique ou d'utilisation, où la teneur en carbone sur la surface ou dans l'ensemble est réduite en raison de la perte de carbone (réaction avec O₂, H₂ ou volatilisation), formant une phase à faible teneur en carbone (comme l'enrichissement de phase W₂C, Co), réduisant ainsi la dureté (réduite de 10 à 20 %), la résistance à l'usure et la résistance.

Mécanisme de décarbonisation :

Oxydation du carbone : À haute température (> 800 °C), le carbone réagit avec O₂ pour former CO/CO₂, et le WC se décompose en W₂C (dureté 1600-1800 HV, faible résistance à l'usure).

Réaction : $2WC + O_2 \rightarrow W_2C + CO_2$.

Volatilisation du carbone : Lors du frittage sous vide (10^{-4} Pa, >1400°C), le carbone est perdu sous forme gazeuse (C, CO).

Enrichissement en phase Co : Après perte de carbone, la proportion de phase Co augmente (> 20 % en poids) et une couche ramollissante (dureté < 1000 HV) se forme.

Phase à faible teneur en carbone : W₂C (fragilité élevée, KIC < 8 MPa·m^{1/2}) ou W libre (dureté < 1200 HV), réduit la résistance à l'usure.

Ce qui se produit:

Frittage : Déparaffinage insuffisant (O₂ > 10 ppm), oxydation à haute température.

Traitement thermique : Mauvais contrôle de l'atmosphère (excès de H₂, fuite d'O₂).

Utilisation : Découpe à haute température (>1000°C, exposition à l'air) ou environnement corrosif (perte de carbone induite par H₂S).

2.2 Décarbonisation (involontaire)

condition:

Température : >800°C (frittage 1350-1450°C, traitement thermique 1000-1200°C).

Atmosphère : O₂ (>10 ppm), H₂ (débit >20 L/min, pour induire la volatilisation du C).

Degré de vide : > 10^{-2} Pa (perte de gaz carbonique).

Temps : >1 heure (couche décarburée 0,1-0,5 mm).

résultat:

Épaisseur de la couche décarburée : 0,1-1 mm, la dureté tombe à 1000-1600 HV.

Teneur en carbone : Surface diminuée de 0,5-2 % en poids, rapport W₂C augmenté de 10-30 %.

Porosité : augmentée de 0,01 à 0,05 % (microfissures).

Performances : Résistance à l'usure diminuée de 20-50 % (taux d'usure > 0,1 mm³/h), probabilité de fracture augmentée de 20-30 %.

2.3 Impact de la décarbonisation

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

Inconvénients de la décarbonisation :

Réduction de la dureté : la dureté de surface diminue de 1020 % (1000/1600 HV) et la résistance à l'usure diminue de 2050 %.

Résistance réduite : le W2C est très cassant, avec une diminution de 10 à 15 % de la résistance à la flexion (< 2 GPa) et une augmentation de 20 à 30 % de la probabilité de fracture.

Détérioration de la résistance à la corrosion : la couche de décarburation est lâche et le taux de corrosion augmente de 50 à 100 % ($H_2SO_4 > 0,05$ mm/an).

Durée de vie raccourcie : La durée de vie du pic est réduite de 3050 % (< 500 heures) et l'efficacité de coupe de l'outil est réduite de 20 %.

Cas de décarbonisation :

Défaillance du pic : WC+10%Co ($\varnothing 20$ mm), fritté (1450°C, O₂ 20 ppm), couche de décarburation superficielle 0,3 mm, dureté 1400 HV, usure 0,15 mm³/h, durée de vie 400 heures (normalement 800 heures).

Usure de l'outil : WC+6%Co ($\varnothing 12$ mm), coupe haute température (1000°C, air), couche de décarburation 0,2 mm, rapport W2C 20%, durée de vie de coupe réduite de 30%.

2.4 Contrôle de la décarbonisation

Optimisation de l'atmosphère :

Contrôle H₂ : débit 515 L/min (déparaffinage/frittage), O₂ < 5 ppm, pour éviter la volatilisation du C.

Ar : Pendant le frittage/traitement thermique, le débit d'Ar est de 510 L/min, O₂ < 10 ppm.

Degré de vide : 10^{-4} 10^{-5} Pa, pour réduire la perte de gaz carbonique.

Optimisation du déparaffinage :

Température : 200/600°C, vitesse de chauffe 3°C/min, H₂ 10 L/min.

Résultats : carbone résiduel $< 0,05$ %, O₂ < 5 ppm, couche décarburée $< 0,01$ mm.

Optimisation du frittage :

Température : 1350/1450°C, contrôle de la température $\pm 3^\circ\text{C}$, éviter de trop brûler.

HIP : 1350°C, 120 MPa (Ar), porosité $< 0,001\%$, W2C supprimé.

Détection et réparation :

Contrôle : MEB (rapport W2C < 5 %), XPS (écart de teneur en carbone $< \pm 0,1$ % en poids).

Réparation : Cémentation (1100°C, C₂H₂ 5 L/min, 1 heure), dureté restaurée 2000 HV.

Exemple : pic WC+8%Co ($\varnothing 20$ mm), frittage optimisé (1350°C, 10^{-5} Pa, H₂ 10 L/min), pas de couche décarburée, dureté 2000 HV, durée de vie 1000 heures.

3. Comparaison entre la cémentation et la décarburation

caractéristiques	carburation	Décarburation
définition	Les atomes de carbone se diffusent dans la surface, formant une phase à haute teneur en	Perte de carbone, formation d'une phase à faible teneur en carbone

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

caractéristiques	carburation	Décarburation
	carbone	
mécanisme	La diffusion du carbone génère une phase WC/ η	L'oxydation/volatilisation du carbone génère un enrichissement en W ₂ C/Co
température	1000/1200°C	>800°C
atmosphère	C ₂ H ₂ /CH ₄ , H ₂ , Ar	O ₂ (>10 ppm), excès de H ₂
Épaisseur de la couche	0,11 mm	0,11 mm
dureté	Augmenté de 1015% (2000/2200 HV)	1020% de réduction (1000/1600 HV)
Résistance à l'usure	Augmentation de 2030% (<0,05 mm ³ /h)	Réduction 2050% (>0,1 mm ³ /h)
Résistance à la corrosion	Augmentation de 2050 % (<0,01 mm/an)	Chute de 50 à 100 % (>0,05 mm/an)
dureté	La phase η est trop faible (KIC < 8 MPa·m ^{1/2})	Le W ₂ C augmente et diminue (KIC < 8 MPa·m ^{1/2})
application	Pics, coupeurs, joints	Éviter, utiliser après réparation
contrôle	de la source de carbone , temps	Atmosphère (O ₂ < 5 ppm), vide

4. Suggestions d'optimisation

Optimisation de la carburation :

Source de carbone : C₂H₂ (510 L/min), CH₄ (1020 sccm) , pureté > 99,9 %.
 Température : 1000/1100°C (phase gazeuse/plasma), éviter la phase η (<5 vol%).
 Temps : 12 heures, couche carburée 0,20,5 mm, écart de dureté <±50 HV.
 Inspection : MEB (grain WC 0,52 μ m) , XPS (teneur en carbone ± 0,1 % en poids) .
 Post-traitement : polissage (Ra <0,2 μ m) , PVD CrN (2 μ m) , résistance à l'usure augmentée de 30%.

Contrôle de la décarbonisation :

Atmosphère : H₂ 10 L/min, O₂ < 5 ppm, Ar 5 L/min.
 Vide : 10⁻⁵ Pa, la perte de carbone lors du frittage/traitement thermique est réduite de 90 %.
 Déparaffinage : 200/600°C, carbone résiduel <0,05%, O₂ <5 ppm.
 HIP : 1350°C, 120 MPa, porosité < 0,001 %, W₂C < 5 %.
 Surveillance : Spectroscopie en ligne (concentration O₂/CO), écart de teneur en carbone <±0,1 % en poids .

Optimisation des équipements :

Four de frittage : contrôle de température ±3°C, vide 10⁻⁵ Pa, uniformité ±5°C.
 Système de gaz : précision du débit C₂H₂/CH₄ ±0,1 L/min, détection O₂ <5 ppm.

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

Inspection : MEB/XPS (grain/composition), ultrasons (fissure>0,1 mm).

Adaptation de l'application :

Cémentation : pics miniers (roches à haute dureté), outils (coupe à grande vitesse).

Réparation par décarburation : cémentation (1100°C, C₂H₂, 1 heure) + revêtement (CrN, 2 µm) .

5. Normes

GB/T 183762014 : Porosité < 0,01 %, uniformité > 95 %.

GB/T 51692013 : Porosité A02B00C00 (vide), A00B00C00 (HIP).

GB/T 38502015 : Densité 14,515,0 g/cm³ , écart <±0,1 g/ cm³ .

GB/T 38512015 : résistance à la flexion 1,82,8 GPa .

GB/T 7997-2017 : Dureté 1400-2200 HV.

NACE MR0175 : Résistant au H₂S/CO₂, taux de corrosion < 0,005 mm/an.

ASTM G65 : Taux d'usure < 0,05 mm³ / h.

ISO 6508 : Écart de dureté < ±50 HV.

6. Conclusion

La carburation du carbure cémenté est réalisée en phase gazeuse (C₂H₂, 1000-1200°C), en phase solide (graphite, 1100-1300°C) ou par carburation plasma (CH₄, 800-1000°C), formant une couche carburée de 0,11 mm sur la surface, augmentant la dureté à 2000-2200 HV, augmentant la résistance à l'usure de 2030% (perte par usure <0,05 mm³/h) et la résistance à la corrosion de 2050% (H₂S/H₂SO₄ <0,01 mm/an), prolongeant considérablement la durée de vie du pic (1000-1500 heures), de l'outil et du joint (augmentée de 3050%). Français La décarburation forme une couche riche en W₂C/Co due à l'oxydation à haute température (> 800 °C) ou à la volatilisation du carbone, ce qui réduit la dureté de 1 020 % (1 000 à 1 600 HV) et la résistance à l'usure de 2 050 %. Elle doit être contrôlée en optimisant l'atmosphère (O₂ < 5 ppm), le vide (10⁻⁵ Pa) et le HIP (1 350 °C, 120 MPa). Un processus de carburation précis (C₂H₂ 510 l/min, 12 heures) et une prévention et un contrôle stricts de la décarburation (H₂ 10 l/min, carbone résiduel < 0,05 %) peuvent garantir la stabilité des performances du carbure cémenté.

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

Copyright© 2024 CTIA All Rights Reserved
标准文件版本号 CTIAQCD-MA-E/P 2024 版
www.ctia.com.cn

电话/TEL: 0086 592 512 9696
CTIAQCD-MA-E/P 2018-2024V
sales@chinatungsten.com

CTIA GROUP LTD

30 Years of Cemented Carbide Customization Experts

Core Advantages

30 years of experience: We are well versed in cemented carbide production and processing , with mature and stable technology and continuous improvement .

Precision customization: Supports special performance and complex design , and focuses on customer + AI collaborative design .

Quality cost: Optimized molds and processing, excellent cost performance; leading equipment, RMI, ISO 9001 certification.

Serving Customers

The products cover cutting, tooling, aviation, energy, electronics and other fields, and have served more than 100,000 customers.

Service Commitment

1+ billion visits, 1+ million web pages, 100,000+ customers, and 0 complaints in 30 years!

Contact Us

Email : sales@chinatungsten.com

Tel : +86 592 5129696

Official website : www.ctia.com.cn

WeChat : Follow "China Tungsten Online"



COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

Copyright© 2024 CTIA All Rights Reserved
标准文件版本号 CTIAQCD-MA-E/P 2024 版
www.ctia.com.cn

电话/TEL: 0086 592 512 9696
CTIAQCD-MA-E/P 2018-2024V
sales@chinatungsten.com

appendice:

Qu'est-ce que le jet de liant en carbure cimenté ?

Le jet de liant de carbure cimenté (WC-Co) est une technologie avancée de fabrication additive qui utilise des liants liquides pour lier sélectivement des poudres de carbure cimenté afin de créer des structures tridimensionnelles hautes performances couche par couche. Elle convient à la fabrication d'outils de coupe complexes en carbure cimenté, de forets miniers et de moules résistants à l'usure. Développée par le Massachusetts Institute of Technology (MIT) en 1994 (référence : brevet MIT US5340656A), cette technologie a ensuite été commercialisée par ExOne, Desktop Metal et d'autres entreprises. Ces dernières années, elle a été largement utilisée dans le domaine du carbure cimenté. Voici une présentation détaillée de sa définition, de son historique, de ses principes, de son déroulement, de ses paramètres techniques, de ses caractéristiques, de ses domaines d'application, de ses données de performance et de ses stratégies d'optimisation.

1. Définition et concepts de base du moulage par injection de liant en carbure cimenté

Le jet de liant de carbure cimenté est une méthode de fabrication additive basée sur un lit de poudre. Il utilise un jet de liant de haute précision pour lier des poudres de carbure cimenté (comme le WC-Co) et les empiler progressivement pour former des pièces tridimensionnelles. Contrairement aux méthodes traditionnelles de fabrication du carbure cimenté (comme le pressage et le frittage) ou à l'impression 3D par fusion (comme la fusion sélective par laser, SLM), le jet de liant ne fait pas fondre directement la poudre, mais réalise une solidification initiale entre les particules par l'action physique ou chimique du liant. Le « corps vert » obtenu (pièce verte) nécessite un post-traitement, comme un dégraissage et un frittage, pour améliorer sa résistance et sa densité.

Adéquation du moulage par injection de liant en carbure cimenté :

Carbure cimenté (WC-Co, teneur en Co 6%-12%), dureté pouvant atteindre HV 1500-1800, ténacité à la rupture (K_{IC}) 10-15 MPa·m^{1/2}.

Convient aux pièces aux géométries complexes, telles que les outils avec canaux de refroidissement internes ou les moules à structures poreuses.

Histoire et développement de la technologie de moulage par injection de liant pour carbure cimenté

La technologie de projection de liant a été développée par le MIT en 1994 et initialement utilisée pour le moulage au sable (brevet US5340656A). En 1999, ExOne l'a commercialisée et a lancé le premier appareil commercial, la ZPrinter 310. En 2016, Desktop Metal a lancé Shop System, qui a optimisé la précision de projection et l'efficacité de la production.

technologie de jet pour les applications en carbure cimenté :

En 2018, ExOne a lancé le système Innovent+, qui prend en charge le moulage de poudre WC-Co et a une vitesse d'impression allant jusqu'à 2000 cc/h.

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

En 2023, Sandvik Additive Manufacturing a lancé la poudre Osprey WC-Co (granulométrie 5-15 μ m), optimisée pour le jet de liant et dont la densité est augmentée à 99,1 %.

Progrès récents : En 2025, GE Research a développé un nouveau liant nanoparticulaire (taille des particules < 1 μ m) qui augmente la résistance du corps vert de 30 % (de 8 MPa à 10,4 MPa) et réduit considérablement les défauts d'impression.

3. Principe de fonctionnement de la technologie de projection de liant

Le moulage par injection de liant en carbure cémenté permet la construction de pièces grâce aux étapes suivantes :

Épandage de poudre

Utilisez un rouleau ou un grattoir pour répartir uniformément la poudre de carbure cémenté (comme le WC-10Co, granulométrie de 5 à 20 μ m) sur la plate-forme de construction, et l'épaisseur de la couche est généralement de 50 à 100 μ m.

La poudre doit avoir une fluidité élevée (angle de repos < 30°) et une distribution granulométrique uniforme (écart D50 < 5 %) pour garantir une couche de haute qualité.

Jet de liant

Des buses de haute précision (résolution 40-50 μ m, nombre de buses > 1000) pulvérisent sélectivement le liant liquide selon les données du modèle CAO.

Les liants courants comprennent les liants à base d'eau (tels que l'alcool polyvinylique (PVA), avec une viscosité de 5 à 10 mPa·s) et les liants organiques (tels que la résine phénolique, avec une teneur en solides de 30 à 40 %).

Le liant pénètre dans les espaces entre les particules de poudre (profondeur de pénétration 100-150 μ m) et se solidifie par liaison physique ou réaction chimique (temps de durcissement 0,5-1 s).

Construction en cascade

La plate-forme de construction descend d'une couche (en fonction de l'épaisseur de la couche) et le processus d'étalement et d'éjection de la poudre est répété jusqu'à ce que la pièce soit terminée.

Le liant agit comme une structure de support naturelle, maintenant la stabilité de la pièce sans avoir besoin de supports supplémentaires.

Post-traitement

Le corps vert est retiré du lit de poudre et subit un déliantage (200-400°C, 2-4 h) pour éliminer le liant.

Frittage (1350-1450°C, vide < 10⁻² Pa, 4-8 heures), les particules de WC-Co sont combinées et la densité est augmentée à 98%-99,2%.

Le pressage isostatique à chaud (HIP, 1500°C, 100 MPa, 2 h) est facultatif pour réduire davantage la porosité (<0,5%).

4. Procédé et paramètres techniques de la technologie de projection de liant

Le procédé de projection de liant pour le carbure cémenté implique les paramètres détaillés suivants :

Caractéristiques de la poudre :

Matériau : poudre de WC-Co (comme WC-8Co, WC-12Co).

Taille des particules : 5-20 μ m, écart D50 < 5 %, sphéricité > 0,9 (mesure SEM).

Composition chimique : teneur en WC 88 %-94 %, teneur en Co 6 %-12 %, teneur en oxygène <

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

0,3 % en poids (analyse LECO).

Poudrage et pulvérisation :

Épaisseur de couche : 50-100 μm , écart $\leq \pm 5 \mu\text{m}$ (vérifié par télémètre laser).

Pression d'injection : 0,2-0,5 MPa, volume d'une goutte 10-20 pL (mesuré par vidéo haute vitesse).

Vitesse du jet : 20-50 mm/s, résolution d'impression 1200 dpi.

Durcissement et contrôle environnemental :

Temps de durcissement de l'adhésif : $< 1 \text{ s}$, température ambiante 20-30°C, humidité 40%-60%.

La chambre de construction doit être équipée d'une protection contre les gaz inertes (tels que l'azote, la teneur en oxygène $< 500 \text{ ppm}$).

Post-traitement :

Dégraissage : 250-350°C, vitesse de chauffe 1-2°C/min, maintien au chaud pendant 3 heures, taux de carbone résiduel $< 0,5 \%$ en poids .

Frittage : 1350-1450°C, vitesse de chauffe 5°C/min, degré de vide $< 5 \times 10^{-3} \text{ Pa}$, maintenir au chaud pendant 6 heures.

Taux de retrait : le retrait linéaire est de 12 à 15 %, nécessitant une conception de pré-compensation (précision de $\pm 0,1 \text{ mm}$).

Densité : 98,5%-99,2% (mesurée par la méthode d'Archimède), porosité $< 1\%$ (scanner CT, résolution $< 5 \mu\text{m}$) .

Besoins en équipement :

Imprimantes 3D de haute précision (telles que ExOne Innovent +, volume de construction 160 $\times$ 65 $\times$ 65 mm).

Tête d'impression : Tête d'impression Xaar 1003, nombre de buses 1000, résolution 40 μm .

Système d'alimentation en poudre : tamisage par vibration, écart d'uniformité $< 3 \%$.

Contrôle de la température : chauffage infrarouge, écart $\leq \pm 2^\circ\text{C}$.

caractéristiques de la technologie de moulage par injection de liant

Le moulage par injection de liant en carbure cémenté présente les caractéristiques suivantes :

Grande liberté de conception :

Des géométries complexes peuvent être imprimées, telles que des canaux de refroidissement internes (diamètre de 0,5 à 2 mm), des structures poreuses (taille des pores de 0,1 à 1 mm) et des pièces à parois minces (épaisseur de paroi $< 0,5 \text{ mm}$).

Prend en charge la conception de gradient fonctionnel, comme une dureté de surface élevée (HV 1700) et une ténacité interne élevée ($K_{IC} > 12 \text{ MPa} \cdot \text{m}^{1/2}$) .

Faible apport de chaleur :

Imprimez à température ambiante (20-30°C) pour éviter le grossissement des grains ($> 2 \mu\text{m}$) ou la volatilisation de la phase Co causée par la fusion à haute température ($> 3000^\circ\text{C}$).

La contrainte thermique est $< 50 \text{ MPa}$ (mesurée par un appareil de mesure de contrainte à rayons X), ce qui est bien inférieur à la SLM ($> 200 \text{ MPa}$).

Haute efficacité de production :

Vitesse d'impression : 2000 cc/h (données ExOne), ce qui permet de produire 50 à 100 petites pièces (volume 10 cm^3) par heure.

Aucune structure de support n'est requise, les pièces peuvent être disposées de manière dense et

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

l'efficacité de la construction est améliorée de 30 à 50 %.

Compatibilité des matériaux :

Prend en charge une variété de rapports WC-Co, tels que WC-6Co (dureté élevée) et WC-12Co (ténacité élevée).

Le taux de récupération de la poudre est > 99 % et peut être réutilisé 5 à 10 fois (augmentation de la teneur en oxygène < 0,1 % en poids).

Rapport coût-efficacité :

Coût de la poudre : la poudre WC-Co coûte entre 50 et 60 \$/kg (indiqué par Sandvik), ce qui est 20 à 30 % inférieur à la poudre SLM.

Coût d'exploitation de l'équipement : 1 à 2 \$/heure (consommation électrique < 5 kWh), coût unitaire 5 à 10 \$ (volume de la pièce 10 cm³).

limitation:

Le corps vert a une faible résistance (8-10 MPa, test de traction Instron) et se brise facilement.

Le taux de retrait de frittage est de 12 à 15 % et l'écart dimensionnel est de ± 0,1 mm, ce qui nécessite une pré-compensation précise.

Rugosité de surface : Ra 4-6 μm (après frittage), un grenaillage est nécessaire pour la réduire à Ra < 0,1 μm .

6. Domaines d'application et données de performance de la technologie de projection de liant

Le moulage par injection de liant en carbure cimenté présente une valeur unique dans les domaines suivants :

Outils de coupe :

Outil WC-10Co (épaisseur de couche 50 μm), canal de refroidissement interne (diamètre 1 mm) améliore l'efficacité de dissipation thermique de 25 %, durée de vie de coupe 15-18 heures (augmentée de 20 %), vitesse de coupe 1000 m/min (alliage d'aluminium aéronautique).

Forage minier :

Foret WC-8Co (volume 50 cm³), structure en treillis (ouverture 0,5 mm), réduction de poids de 15 %, distance de perçage 1500-1800 m (augmentation de 50 %), dureté HV 1650, K_{1c} 12 MPa·m^{1/2} .

Moule résistant à l'usure :

Filière WC-12Co (épaisseur de paroi 0,4 mm), temps d'extrusion > 1,2 × 10⁶ fois (augmentation de 25 %), dureté HV 1700, taux d'usure < 0,09 mm³ / N · m (test ASTM G65).

Prototypage rapide :

Le cycle de production est de 6 à 8 heures (le pressage et le frittage traditionnels prennent 3 à 5 jours) et le coût de R&D est réduit de 50 %, ce qui convient à la vérification de la conception des outils en carbure cimenté.

Données de performance (mesurées) :

Dureté : HV 1650-1750 (dureteuse Vickers, charge 30 kg).

Ténacité à la rupture : K_{1c} 11-13 MPa·m^{1/2} (méthode de la poutre entaillée à un seul bord, ASTM E399).

Densité : 98,8%-99,2% (méthode d'Archimède).

Durée de vie en fatigue : >1,2×10⁵ fois (test de fatigue en flexion rotationnelle, 500 MPa).

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

7. Comparaison de la technologie de projection de liant avec d'autres technologies

Comparé à la fusion sélective par laser (SLM) :

Le jet de liant présente une contrainte thermique plus faible (< 50 MPa contre > 200 MPa) et une taille de grain plus petite ($0,5$ à $1 \mu\text{m}$ contre 1 à $3 \mu\text{m}$).

Légèrement moins dense (99% contre $99,5\%$), mais 50% moins cher (5 \$ contre 10 \$ la pièce).

Par rapport au pressage et au frittage traditionnels :

Le jet de liant prend en charge les conceptions complexes avec des cycles de production courts (8 heures contre 5 jours), mais nécessite une plus grande précision dans le contrôle du retrait (écart $\pm 0,1$ mm contre $\pm 0,05$ mm).

Une liste complète comparant la technologie de projection de liant avec d'autres technologies de moulage

Le tableau suivant compare la technologie Binder Jetting (BJ) avec la fusion sélective par laser (SLM), la fusion par faisceau d'électrons (EBM), la modélisation par dépôt de fil fondu (FDM), la presse et le frittage (P&S) et le dépôt d'énergie dirigée (DED).

indice	Jet de liant (BJ)	Fusion sélective par laser (SLM)	Fusion par faisceau d'électrons (EBM)	Modélisation du dépôt de fil fondu (FDM)	Pressage et frittage conventionnels (P&S)	Dépôt d'énergie dirigée (DÉCÉDÉ)
principe	Les poudres sont liées par pulvérisation de liant, empilées couche par couche, puis frittées et solidifiées.	Le laser fait fondre la poudre, la dépose couche par couche et lui donne une forme fondue.	Le faisceau d'électrons fait fondre la poudre et la dépose couche par couche dans un environnement sous vide à haute température.	Le fil thermofusible est extrudé, déposé couche par couche, puis refroidi et solidifié.	La poudre est pressée et frittée à haute température pour se former et se solidifier.	Le laser ou l'arc fait fondre la poudre/le fil et le dépose couche par couche.
Adéquation du matériau	Métal (tel que WC-Co), céramique, sable ; granulométrie de poudre $5-20 \mu\text{m}$.	Métaux (tels que les alliages de titane, l'acier), une petite quantité de nickel ; taille des particules $10-45 \mu\text{m}$.	Métaux (tels que le titane, les alliages à base de nickel) ; taille des particules $20-75 \mu\text{m}$.	Thermoplastiques, une petite quantité de matériaux composites ; diamètre du fil $1,75-3 \text{ mm}$.	Poudre métallique (comme WC-Co), céramique ; granulométrie $1-10 \mu\text{m}$.	Métaux (tels que l'acier, les alliages de nickel), matériaux composites ; poudre/fil $50-150 \mu\text{m}$.
Précision	$\pm 0,1 \text{ mm}$, épaisseur de couche $50-100 \mu\text{m}$, résolution $40-50 \mu\text{m}$ (buse).	$\pm 0,05 \text{ mm}$, épaisseur de couche $20-50 \mu\text{m}$, résolution $20-30 \mu\text{m}$ (faisceau laser).	$\pm 0,2 \text{ mm}$, épaisseur de couche $50-100 \mu\text{m}$, résolution $50-100 \mu\text{m}$ (faisceau d'électrons).	$\pm 0,2 \text{ mm}$, épaisseur de couche $100-200 \mu\text{m}$, résolution $100-200 \mu\text{m}$ (buse).	$\pm 0,05 \text{ mm}$, dépend de la précision du moule, la taille des particules affecte l'uniformité.	$\pm 0,5 \text{ mm}$, épaisseur de couche $0,5-2 \text{ mm}$, résolution $0,5-1 \text{ mm}$ (bain fondu).
Vitesse	2000 cc/h , $50-100$	$10-20 \text{ cm}^3 / \text{h}$, $5-$	$20-50 \text{ cm}^3 / \text{h}$, $5-$	$50-100 \text{ cm}^3 / \text{h}$, $10-$	Production en	$500-1000 \text{ cm}^3 /$

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

indice	Jet de liant (BJ)	Fusion sélective par laser (SLM)	Fusion par faisceau d'électrons (EBM)	Modélisation du dépôt de fil fondu (FDM)	Pressage et frittage conventionnels (P&S)	Dépôt d'énergie dirigé (DÉCÉDÉ)
d'impression	pièces/heure (10 cm ³).	10 pièces/heure (10 cm ³).	15 pièces/h (10 cm ³).	20 pièces/h (10 cm ³).	série, 1 à 5 heures par pièce (la préparation du moule prend plusieurs semaines).	h, 20-50 pièces/h (10 cm ³).
coût	Moyen (coûts d'équipement et de matériel modérés, faibles coûts d'exploitation).	Élevé (équipement coûteux, coûts de matériel et d'exploitation élevés).	Élevé (l'équipement nécessite un environnement sous vide et les coûts de matériel et d'exploitation sont élevés).	Faible (faibles coûts d'équipement et de matériel, faibles coûts d'exploitation).	Moyen (les coûts d'équipement et de matériaux sont modérés, mais les coûts de développement des moules sont élevés).	Moyen (coût d'équipement élevé, coûts de matériel et d'exploitation moyens).
Qualité de surface	Ra 4-6 μm (après frittage), Ra < 0,1 μm après grenaillage.	Ra 10-15 μm, doit être usiné à Ra < 0,2 μm.	Ra 20-30 μm, doit être usiné à Ra < 0,5 μm.	Ra 5-10 μm, doit être post-traité à Ra < 0,2 μm.	Ra 0,1-0,5 μm (précision du moule), aucun traitement supplémentaire requis.	Ra 20-50 μm, doit être usiné à Ra < 0,5 μm.
Exigences de post- traitement	Déliantage (200-400 °C, 3 h), frittage (1350-1450°C, 6 h), HIP (facultatif).	Traitement thermique (900-1200°C, 2 h), usinage.	Traitement thermique (1000-1300°C, 2 h), usinage.	Aucun traitement thermique requis, retrait du support et meulage requis.	Frittage (1300-1500 °C, 4-8 h) sans traitement supplémentaire.	Traitement thermique (800-1100°C, 2 h), usinage.
Liberté de conception	Canaux internes hauts (0,5-2 mm), parois minces (<0,5 mm), structure en gradient.	Moyen, canaux internes (0,3-1 mm), structure de support requise.	Moyen, canaux internes (0,5-2 mm), structure de support requise.	Faible, limité au chemin du fil, pas de structure interne.	Faible, dépendant de la conception du moule, limité par des structures complexes.	Fabrication haute, restauration ou grande pièce, canaux internes (1-5 mm).
Performances du carbure	Dureté HV 1650-1750, K _{1c} 11-13 MPa·m ^{1/2} , densité 98,8%-99,2%.	Dureté HV 1700-1900, K _{1c} 10-12 MPa·m ^{1/2} , densité 99,5%.	Dureté HV 1600-1800, K _{1c} 9-11 MPa·m ^{1/2} , densité 99,3%.	Non applicable, difficile à manipuler WC-Co.	Dureté HV 1800-2000, K _{1c} 12-15 MPa·m ^{1/2} , densité 99,8%.	Dureté HV 1600-1700, K _{1c} 10-12 MPa·m ^{1/2} , densité 98%-99%.
Stress thermique	<50 MPa (jauge de	> 200 MPa, un	>300 MPa, un	<20 MPa, pas	<100 MPa,	>150 MPa, un

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

Copyright© 2024 CTIA All Rights Reserved
标准文件版本号 CTIAQCD-MA-E/P 2024 版
www.ctia.com.cn

电话/TEL: 0086 592 512 9696
CTIAQCD-MA-E/P 2018-2024V
sales@chinatungsten.com

indice	Jet de liant (BJ)	Fusion sélective par laser (SLM)	Fusion par faisceau d'électrons (EBM)	Modélisation du dépôt de fil fondu (FDM)	Pressage et frittage conventionnels (P&S)	Dépôt d'énergie dirigé (DÉCÉDÉ)
	contrainte à rayons X), faible apport de chaleur.	traitement thermique est nécessaire pour le soulager.	traitement thermique est nécessaire pour le soulager.	d'apport de chaleur.	uniforme pendant le frittage.	traitement thermique est nécessaire pour le soulager.
Taille des grains	0,5-1 µm (après frittage, mesuré par MEB).	1-3 µm (après fusion, mesure SEM).	2-5 µm (après fusion, mesure SEM).	non applicable.	0,5-2 µm (après pressage, mesuré par MEB).	5-10 µm (solidification du bain de fusion, mesure SEM).
Scénario d'application	Outils de coupe (WC-10Co), forets miniers, prototypes de moules.	Composants aéronautiques de haute précision (Ti6Al4V), implants médicaux.	Aubes de turbines d'aviation (alliages à base de nickel), pièces de réparation.	Prototypage, produits de consommation (pièces ABS).	Grandes quantités d'outils en carbure (forets WC-Co).	Réparation métallique à grande échelle, fabrication additive (structures en acier).
limitation	Le corps vert a une faible résistance (8-10 MPa) et un retrait de 12 à 15 %.	Coût élevé, nécessite une structure de support et présente une contrainte thermique élevée.	Coût élevé, nécessite un environnement sous vide et présente une surface rugueuse.	Sélection de matériaux limitée et aucune capacité de formage des métaux.	Le coût du moule est élevé et la liberté de conception est faible.	Faible précision, mauvaise qualité de surface et grande zone affectée par la chaleur.
Impact environnemental	Taux de récupération de poudre >99%, consommation énergétique 5 kWh/h.	Le taux de récupération de poudre est de 90% et la consommation énergétique est de 10 kWh/h.	Le taux de récupération de poudre est de 85% et la consommation énergétique est de 15 kWh/h.	Faible gaspillage de matériaux et consommation énergétique de 2 kWh/h.	Les déchets matériels représentent 5 à 10 % et la consommation d'énergie est de 8 kWh/h.	Les déchets matériels représentent 10 à 15 % et la consommation d'énergie est de 12 kWh/h.

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

appendice:

Application du carbure cimenté dans les électrolyseurs à énergie nouvelle

Le carbure cimenté (principalement composé de carbure de tungstène WC et de phases liantes telles que Co et Ni, teneur en WC 8594 % en poids, phase liante 615 % en poids) présente un potentiel d'application important dans les électrolyseurs à énergie nouvelle (tels que l'électrolyseur alcalin AWE, l'électrolyseur à membrane échangeuse de protons PEM et l'électrolyseur à oxyde solide SOEC) en raison de sa dureté élevée (1400-2200 HV), de son excellente résistance à l'usure (perte par usure < 0,05 mm³ / h, ASTM G65), de sa résistance à la corrosion (H₂SO₄/H₂S < 0,01 mm/an, NACE MR0175) et de sa stabilité à haute température (> 800 °C). L'électrolyseur à énergie nouvelle est l'équipement de base de l'hydrogène vert (H₂), qui produit de l'hydrogène et de l'oxygène par électrolyse de l'eau, soutient le stockage d'énergie des énergies renouvelables (comme l'énergie éolienne, l'énergie solaire) et la transformation verte de l'industrie de la décarbonisation dure (comme l'industrie sidérurgique et chimique).

S'appuyant sur les propriétés des matériaux, les normes internationales (telles que GB/T 18376-2014 et IEC 62976) et les tendances du secteur du carbure cimenté, cet article analyse son application, ses défis et ses pistes d'optimisation dans les cellules électrolytiques. Il recommande avec modération les capacités de CTIA GROUP LTD en matière de recherche et développement de composants en carbure cimenté hautes performances. Il est clairement précisé que le contenu de cet article n'est pas lié au processus de carburation et de décarburation du carbure cimenté.

1. Présentation du nouvel électrolyseur énergétique

Les électrolyseurs à énergie nouvelle produisent de l'hydrogène vert en électrolysant l'eau (H₂O → H₂ + ½ O₂) et sont classés dans les principaux types suivants :

Électrolyseur alcalin (AWE) :

Principe : Une solution KOH/NaOH (2530 % en poids) est utilisée comme électrolyte, du Ni ou de l'acier revêtu de Ni est utilisé comme électrode et des plaques bipolaires séparent la cathode et l'anode.

Caractéristiques:

Technologie mature, faible CAPEX (5001000 €/kW, prévision 2030 300 €/kW).

Rendement : 6080% (4050 kWh/kg H₂).

Durée de vie : > 80 000 heures.

Défis : Électrolyte corrosif (pH >14), séparation gaz-liquide complexe.

Applications : Production d'hydrogène à grande échelle (> 1 MW), stockage d'énergie dans les parcs éoliens.

Électrolyseur à membrane échangeuse de protons (PEM) :

Principe : Utiliser une membrane polymère solide (comme le Nafion) comme électrolyte, un catalyseur Pt/ Ir, une plaque bipolaire en Ti ou en acier inoxydable.

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

Caractéristiques:

Rendement élevé : 7090% (3545 kWh/kg H₂).

La réponse dynamique est rapide (quelques secondes), ce qui convient aux énergies renouvelables intermittentes.

Les CAPEX sont élevés (1000-2000 €/kW, prévision 2030 500 €/kW).

Durée de vie : 20 000 à 60 000 heures.

Défis : Les catalyseurs à base de métaux précieux sont coûteux et corrosifs dans les environnements acides (pH < 2).

Applications : Production d'hydrogène distribuée, piles à combustible pour le transport.

Électrolyseur à oxyde solide (SOEC) :

Principe : Utilisation d'électrolytes céramiques (type YSZ), d'électrodes Ni ou pérovskite à haute température (500-850°C).

Caractéristiques:

Rendement ultra élevé : >90% (<40 kWh/kg H₂).

CAPEX élevé (>2000 €/kW, phase laboratoire).

Durée de vie : 10 000 à 20 000 heures.

Défis : Étanchéité à haute température, stabilité aux cycles thermiques.

Application : Couplage de la chaleur résiduelle industrielle et production d'hydrogène à grande échelle dans le futur.

Scénarios d'application du carbure cimenté : le carbure cimenté est principalement utilisé dans les composants clés des électrolyseurs, tels que les plaques bipolaires, les joints, les buses et les revêtements d'électrodes résistants à l'usure pour faire face aux défis de la corrosion, de l'usure et des températures élevées.

2. Application du carbure cimenté dans les cellules électrolytiques

Grâce à sa dureté, sa résistance à la corrosion et sa stabilité mécanique élevées, le carbure cimenté peut remplacer les matériaux traditionnels (tels que le nickel, le titane et l'acier inoxydable) dans les cellules électrolytiques, améliorant ainsi la durée de vie des composants (augmentation de 20 à 50 %) et l'efficacité du système (réduction de la maintenance de 10 à 20 %). Parmi les applications spécifiques, on peut citer :

2.1 Plaque bipolaire en alliage dur

Fonction : Sépare les cellules de l'électrolyseur, conduit l'électricité et distribue l'électrolyte/gaz.

Exiger:

Résistance à la corrosion : AWE (KOH, pH >14), PEM (H₂SO₄, pH <2).

Conductivité : Résistivité < 10 μΩ·cm.

Résistance mécanique : résistance à la compression > 2 GPa, résistance à la flexion 1,82,8 GPa.

Résistance à l'usure : Taux d'usure < 0,05 mm³ / h (ASTM G65).

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

Avantages du carbure cimenté :

WCCo : Dureté 14002000 HV, taux de résistance à la corrosion KOH/H₂SO₄ < 0,01 mm/an.

WCNi : non magnétique, la résistance aux acides est meilleure que celle à base de Co (H₂SO₄ < 0,005 mm/an).

Conductivité : La résistivité est de 510 μΩ·cm, ce qui est mieux que Ti (40 μΩ·cm).

Stabilité : Stabilité des grains à 800°C, pas de changement de phase.

Exemples :

Plaque bipolaire AWE : WC10%Ni (Ø 200 mm, épaisseur 2 mm), taux de corrosion < 0,005 mm/an, durée de vie > 100 000 heures (acier Ni 50 000 heures).

Plaque bipolaire PEM : revêtement WC6%Co + CrN (2 μm), résistance aux acides augmentée de 30%, conductivité maintenue à 99%.

2.2 Joints en carbure

Fonction : Empêche les fuites d'électrolyte et assure l'étanchéité à l'air (séparation H₂/O₂).

Exiger:

Résistance à la corrosion : Résistant au KOH/H₂SO₄/H₂S.

Résistance à l'usure : usure anti-frottement (taux d'usure < 0,01 mm³/h).

Stabilité à haute température : SOEC nécessite > 800 °C.

Avantages du carbure cimenté :

WCCo /Ni : dureté 16002200 HV, meilleure usure anti-frottement que le PTFE (réduction de l'usure de 50%).

Résistance à la corrosion : H₂S < 0,005 mm/an (NACE MR0175).

Haute température : point de fusion WC 2870°C, SOEC stable sur le plan environnemental.

Exemples :

Bague d'étanchéité SOEC : WC8%Ni (Ø 50 mm), étanchéité >99,9% à 800°C, durée de vie >15 000 heures (joint céramique <10 000 heures).

Joint d'étanchéité AWE : WC10%Co (1 mm d'épaisseur), taux de corrosion environnementale KOH < 0,01 mm/an, cycle de maintenance augmenté de 20 %.

2.3 Buse et tuyau en carbure

Fonction : transport d'électrolyte, H₂/O₂, doit résister à l'érosion et à la corrosion.

Exiger:

Résistance à l'érosion : écoulement de gaz et de liquide à grande vitesse (>10 m/s).

Résistance à la corrosion : Résistant au KOH/H₂SO₄.

Faible frottement : Ra < 0,2 μm.

Avantages du carbure cimenté :

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

WCCo : Dureté 2000 HV, durée de vie de résistance à l'érosion augmentée de 3050% (par rapport à l'acier inoxydable).

Polissage de surface : Ra 0,10,2 μ m , réduit l'adhérence des bulles.

Résistance à la corrosion : H₂SO₄ < 0,01 mm/an.

Exemples :

Buse PEM : WC6%Co (Ø 10 mm), durée de vie à l'érosion 50 000 heures (Ti 20 000 heures).

Revêtement de tuyau AWE : WC10%Ni (2 mm d'épaisseur), taux de corrosion KOH < 0,005 mm/an, coût de maintenance réduit de 15 %.

2.4 Revêtement d'électrode en carbure

Fonction : Améliore l'efficacité catalytique des électrodes et réduit la surtension.

Exiger:

Activité catalytique : Surtension < 300 mV (OER/HER).

Résistance à la corrosion : résistance aux acides/alcalis/hautes températures.

Adhérence : >80 N (test de rayure).

Avantages du carbure cémenté :

Revêtement à base de WC : composé de Ni et de Pt, surtension 200-250 mV, meilleur que le Ni pur (300 mV).

Résistance à la corrosion : H₂SO₄/KOH < 0,01 mm/an.

Adhérence : >100 N (procédé PVD).

Exemples :

Électrode AWE : revêtement WCNi (5 μ m) , surtension OER 220 mV, augmentation du rendement 5 % (électrode Ni 280 mV).

Electrode PEM : revêtement WCPT (2 μ m) , surtension HER 200 mV, durée de vie augmentée de 20%.

3. Avantages et défis du carbure cémenté

3.1 Avantages du carbure cémenté

Résistance à la corrosion :

WCCo /Ni dans KOH (pH >14) et H₂SO₄ (pH <2) est <0,01 mm/an, ce qui est meilleur que celui de l'acier Ni (0,05 mm/an) ou Ti (0,02 mm/an).

Résistant à la corrosion H₂S/H₂, adapté aux électrolyseurs en eaux profondes ou à haute température .

Résistance à l'abrasion :

Dureté 1400-2200 HV, taux d'usure < 0,05 mm³ / h (ASTM G65), meilleure résistance à l'usure par

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

érosion/frottement que l'acier inoxydable (taux d'usure $0,1 \text{ mm}^3 / \text{h}$).

Stabilité à haute température :

Le point de fusion du WC est de 2870°C et il n'y a pas de changement de phase dans un environnement SOEC ($500-850^\circ\text{C}$), ce qui est meilleur que le Ni (1455°C).

Conductivité électrique :

La résistivité est de $510 \mu\Omega \cdot \text{cm}$, ce qui répond aux exigences des plaques bipolaires et est meilleure que celle du Ti ($40 \mu\Omega \cdot \text{cm}$).

Durée de vie et rentabilité :

La durée de vie des composants a augmenté de 2050 % ($> 100\,000$ heures) et les coûts de maintenance ont diminué de 1020 %.

Bien que le coût initial soit élevé (WC 50100 \$/kg contre Ni 20 \$/kg), le coût du cycle de vie est faible.

3.2 Défis

Difficulté de traitement :

Le carbure cémenté a une dureté élevée (1400-2200 HV) et nécessite des outils diamantés ou un traitement EDM, ce qui augmente les coûts de 20 à 30 %.

Les formes complexes (telles que les canaux d'écoulement des plaques bipolaires) ont des cycles de traitement longs (> 10 heures/pièce).

coût:

La poudre WC (pureté $> 99,9\%$) et le frittage ($1350-1450^\circ\text{C}$, 10^{-5} Pa) sont chers, le prix par pièce étant 23 fois supérieur à celui du Ti.

Les revêtements en métaux précieux (tels que Pt, Ir) augmentent encore les dépenses d'investissement.

poids:

Densité $14,515,0 \text{ g/cm}^3$ (contre Ti $4,5 \text{ g/cm}^3$), ne convient pas aux électrolyseurs mobiles.

Activité catalytique :

Le WC pur a une activité catalytique limitée (surtension $> 300 \text{ mV}$) et nécessite un revêtement composite Pt/Ni, ce qui augmente la complexité du processus.

fragilité:

La ténacité est plus faible ($\text{KIC } 1215 \text{ MPa} \cdot \text{m}^{1/2}$ contre Ni $50 \text{ MPa} \cdot \text{m}^{1/2}$) et la résistance aux chocs doit être optimisée.

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

4. Direction de l'optimisation

Matériel:

WCNi : l'augmentation de la teneur en Ni (1015 % en poids) améliore la résistance aux acides ($H_2SO_4 < 0,005$ mm/an) et réduit la dissolution du Co.

Nano WC : granulométrie 0,20,5 μm , dureté augmentée de 10 % (2200 HV), ténacité augmentée de 15 % ($KIC > 15 MPa \cdot m^{1/2}$).

Revêtement composite : WC+Pt /Ni (PVD, 25 μm) , la surtension est réduite à 200 mV et l'efficacité catalytique est augmentée de 10 %.

Procédé de fabrication :

Fabrication additive : plaques bipolaires WCCo imprimées en 3D , précision du canal d'écoulement $\pm 0,01$ mm, coûts de traitement réduits de 20 %.

Frittage HIP : 1350°C, 120 MPa, porosité $< 0,001\%$, résistance à la corrosion augmentée de 15%.

Traitement de surface : polissage ($Ra < 0,1 \mu m$) + revêtement CrN (2 μm) , résistance à l'usure augmentée de 30%.

Optimisation des coûts :

Recycler la poudre WC (taux de récupération $> 90\%$) et réduire les coûts des matières premières de 20 %.

En remplaçant le catalyseur Pt/ Ir par un alliage NiFe , les dépenses d'investissement peuvent être réduites de 10 à 15 %.

Modularité :

Les plaques bipolaires standardisées (200×200 mm, 2 mm d'épaisseur) sont compatibles avec AWE/PEM, augmentant l'efficacité de la production de 20 %.

Le démontage et le montage rapides des joints réduisent le temps de maintenance de 30 %.

Testé et vérifié :

Essai de corrosion : NACE MR0175, H_2SO_4/KOH , taux de corrosion $< 0,005$ mm/an.

Durabilité : ASTM G65, usure $< 0,05$ mm³/h, cycles $> 100\,000$ fois.

Electrochimie : surtension OER/HER < 250 mV, efficacité $> 80\%$.

5. Normes et spécifications

GB/T 183762014 : Porosité du carbure cémenté $< 0,01\%$, uniformité $> 95\%$.

GB/T 38502015 : Densité 14,515,0 g/cm³ , écart $\leq \pm 0,1$ g/ cm³ .

GB/T 38512015 : résistance à la flexion 1,82,8 GPa .

GB/T 7997-2017 : Dureté 1400-2200 HV, écart $\leq \pm 50$ HV.

IEC 62976 : Conductivité électrique (résistivité $< 10 \mu\Omega \cdot cm$) et résistance à la corrosion (vitesse de corrosion $< 0,01$ mm/an) des plaques bipolaires pour électrolyseurs .

NACE MR0175 : Résistant au H_2S/H_2SO_4 , taux de corrosion $< 0,005$ mm/an.

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

Copyright© 2024 CTIA All Rights Reserved
标准文件版本号 CTIAQCD-MA-E/P 2024 版
www.ctia.com.cn

电话/TEL: 0086 592 512 9696
CTIAQCD-MA-E/P 2018-2024V
sales@chinatungsten.com

ASTM G65 : Taux d'usure < 0,05 mm³ / h.

ISO 6508 : Essai de dureté, écart < ±50 HV.

6. Tendances et cas de l'industrie

s'orienter:

Production d'hydrogène vert : EU RePowerEU vise 20 Mt d'H₂ vert d'ici 2030, demande d'électrolyseurs > 100 GW.

Substitution de matériaux : le carbure cimenté remplace progressivement le Ti (PEM) et l'acier Ni (AWE), réduisant ainsi les CAPEX/OPEX.

Électrolyse à haute température : la demande de SOEC augmente et le marché des composants haute température en carbure cimenté (tels que les joints) se développe.

Intelligence : Surveillance en ligne de la corrosion/usure, capteurs intégrés sur les pièces en carbure et efficacité de maintenance augmentée de 20 %.

Exemples :

Projet AWE : électrolyseur 1 MW (Chine), plaques bipolaires WC10%Ni (200×200 mm), taux de corrosion < 0,005 mm/an, efficacité 75 %, durée de vie > 80 000 heures, réduction des coûts de maintenance 15 %.

Projet PEM : électrolyseur de 500 kW (Allemagne), buse WC6%Co (Ø 10 mm), durée de vie par érosion 50 000 heures, efficacité du système augmentée de 5 %.

Pilote SOEC : électrolyseur 100 kW (USA), bague d'étanchéité WC8%Ni (Ø 50 mm), étanchéité >99,9% à 800°C, durée de vie >15 000 heures.

7. Conclusion

Français Avec sa dureté élevée (1400-2200 HV), sa résistance à la corrosion (H₂SO₄/KOH < 0,01 mm/an), sa résistance à l'usure (perte par usure < 0,05 mm³/h) et sa stabilité à haute température (> 800 °C), le carbure cimenté (WCCo / Ni) présente des avantages significatifs en tant que matériau clé pour les plaques bipolaires, les joints, les buses et les revêtements d'électrodes dans les électrolyseurs à énergie nouvelle (AWE, PEM, SOEC). Par rapport à l'acier Ni traditionnel (durée de vie de 50 000 heures) ou au Ti (taux de corrosion de 0,02 mm/an), la durée de vie des pièces en carbure cimenté est augmentée de 2050 % (> 100 000 heures) et les coûts de maintenance sont réduits de 1020 %, soutenant l'efficacité et l'économie de la production d'hydrogène vert.

Les défis résident dans la difficulté de traitement (augmentation des coûts de 20 à 30 %), le coût initial et l'activité catalytique (revêtement composite requis). Grâce au nano-WC, à la fabrication additive, au frittage HIP et à l'optimisation des catalyseurs NiFe , les dépenses d'investissement et d'exploitation peuvent être encore réduites et la compétitivité améliorée.

CTIA GROUP LTD dispose d'une technologie de pointe dans le domaine du carbure cimenté. Elle utilise de la poudre de nano-WC (D50 0,20,5 µm) , le frittage HIP (1350 °C, 120 MPa) et le

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

Copyright© 2024 CTIA All Rights Reserved
标准文件版本号 CTIAQCD-MA-E/P 2024 版
www.ctia.com.cn

电话/TEL: 0086 592 512 9696
CTIAQCD-MA-E/P 2018-2024V
sales@chinatungsten.com

revêtement PVD (WCPT / Ni , 25 μm) pour développer des plaques bipolaires hautes performances (résistivité $< 10 \mu\Omega \cdot \text{cm}$) , des joints (étanchéité à l'air $> 99,9 \%$) et des buses (durée de vie à l'érosion $> 50\,000$ heures) pour répondre aux conditions de travail difficiles des procédés AWE/PEM/SOEC et fournir des solutions fiables pour la production d'hydrogène vert.

appendice:

Outils de coupe à grande vitesse en carbure

1. Aperçu des outils de coupe à grande vitesse en carbure cémenté

1.1 Définition et caractéristiques des outils de coupe à grande vitesse en carbure cémenté

Définition : Les outils de coupe à grande vitesse en carbure sont fabriqués à partir de carbure de tungstène (WC) et d'une phase de liaison (Co/Ni) (WC 85-94 % en poids , phase de liaison 615 % en poids). Grâce à une rectification de précision et à un dépôt physique en phase vapeur (PVD), des revêtements (tels que TiN , AlTiN) offrent une dureté élevée (1800-2200 HV), une résistance à l'usure et une stabilité à haute température. Ils conviennent à des vitesses de coupe de 500 à 2000 m/min.

Caractéristiques des outils de coupe à grande vitesse en carbure cémenté :

élevée : 1400-2200 HV, la résistance à l'usure est 510 fois meilleure que l'acier rapide (HSS, 800 HV).

Dureté rouge haute température : La dureté est maintenue à >1200 HV à 800-1000°C, adaptée à la coupe à sec.

Résistance à l'usure : usure < 0,05 mm³ / h (ASTM G65), durée de vie de l'outil 500-2000 minutes.

Résistance aux chocs : résistance à la flexion 1,82,8 GPa , ténacité à la rupture KIC 1015 MPa·m^{1/2} .

Application : Traitement de l'acier (HRC 2060), alliage de titane (Ti6Al4V), alliage à base de nickel (Inconel 718), matériau composite en fibre de carbone (CFRP), etc.

1.2 Types d' outils de coupe à grande vitesse en carbure

Outil de tournage : tournage extérieur, usinage de trous intérieurs, vitesse de coupe 500-1500 m/min.

Fraise : fraisage plan, rainurage, vitesse de coupe 600-2000 m/min.

Foret : perçage de trous profonds, vitesse de coupe 300-800 m/min.

Outil d'alésage : usinage de trous de précision, vitesse de coupe 400-1000 m/min.

1.3 Avantages des outils de coupe à grande vitesse en carbure cémenté

Efficacité : La vitesse de coupe est 510 fois supérieure à celle du HSS et l'efficacité du traitement est augmentée de 50 à 100 %.

Durée de vie : Durée de vie de l'outil en carbure revêtu 500-2000 minutes (HSS 50-200 minutes).

Précision : rugosité de surface Ra 0,10,4 μ m , précision d'usinage ±0,01 mm.

Adaptabilité : Convient à la coupe à sec, à la coupe humide et au traitement de divers matériaux.

2. Matériaux pour outils de coupe à grande vitesse en carbure

2.1 Ingrédients

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

Copyright© 2024 CTIA All Rights Reserved
标准文件版本号 CTIAQCD-MA-E/P 2024 版
www.ctia.com.cn

电话/TEL: 0086 592 512 9696
CTIAQCD-MA-E/P 2018-2024V
sales@chinatungsten.com

Matrice :

WC : 8594 % en poids , granulométrie 0,22 μm .

Grain ultrafin (0,20,5 μm) : dureté 2000-2200 HV, excellente résistance à l'usure, adapté à la finition.

Grain moyen-grossier (12 μm) : ténacité KIC 1215 $\text{MPa}\cdot\text{m}^{1/2}$, adapté à l'usinage grossier.

Co : 615 % en poids , améliore la ténacité et la résistance aux chocs.

Faible teneur en Co (68 % en poids) : dureté 1800-2200 HV, forte résistance à l'usure.

Haute teneur en Co (1015 % en poids) : résistance à la flexion 2,22,8 GPa , bonne résistance aux chocs.

Ni : 0,5 % en poids , remplace partiellement le Co et améliore la résistance à la corrosion (H_2SO_4 < 0,01 mm/an).

Additif : Cr3C2/VC (0,21 % en poids), inhibe la croissance des grains et augmente la dureté de 5 à 10 %.

revêtement :

Étain : Dureté 2000-2300 HV, coefficient de frottement 0,4, résistance à l'usure augmentée de 20%.

TiAlN / AlTiN : Dureté 3000-3300 HV, résistance à la chaleur 900-1100°C, durée de vie augmentée de 3050%.

CrN : Dureté 1800-2200 HV, excellente résistance à la corrosion, convient au traitement de l'acier inoxydable.

DLC (Diamond-like Carbon) : Dureté 3000-4000 HV, coefficient de frottement <0,1, adapté au CFRP et aux alliages d'aluminium.

2.2 Structure du gradient des outils de coupe à grande vitesse en carbure cimenté

Surface : faible teneur en Co (68 % en poids), WC à grains ultrafins (0,2-0,5 μm) , dureté 2000-2200 HV.

Noyau : High Co (1012 % en poids), WC à grains moyens-grossiers (12 μm) , ténacité KIC 1215 $\text{MPa}\cdot\text{m}^{1/2}$.

Avantages :

La résistance à l'usure de la surface augmente de 20 à 30 % et la résistance aux chocs du noyau augmente de 15 à 20 %.

La couche de gradient (0,52 mm) réduit la concentration des contraintes et réduit la probabilité de croissance des fissures de 20 %.

Préparation : Pressage de poudre en couches + frittage par pressage isostatique à chaud (HIP) (1350°C, 120 MPa).

2.3 Exigences de performance des outils de coupe à grande vitesse en carbure cimenté

Dureté : 1800-2200 HV (GB/T 7997-2017).

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

Résistance à la flexion : 1,82,8 GPa (GB/T 38512015).

Ténacité à la rupture : 1015 MPa·m^{1/2}.

Résistance à l'usure : Taux d'usure < 0,05 mm³ / h (ASTM G65).

Résistance à la corrosion : taux de corrosion du liquide de refroidissement (pH 710) < 0,01 mm/an.

Conductivité thermique : 80100 W/ m· K , la dissipation thermique est meilleure que celle du HSS (20 W/ m· K) .

3. Procédé de fabrication d'outils de coupe à grande vitesse en carbure cimenté

3.1 Préparation de la poudre

matière première :

WC : D50 0,22 μ m , pureté > 99,9 %.

Co/Ni : D50 12 μ m , pureté >99,9 %.

Cr3C2/VC : D50 0,51 μ m , pureté > 99,9 %.

broyage à boulets :

Équipement : Broyeur à boulets planétaire (billes de ZrO₂, rapport billes/matière 10:1).

Paramètres : vitesse 300 tr/min, temps 1624 heures, milieu alcool.

Résultats : Écart de taille des particules <±0,1 μ m , uniformité de la composition >95 %.

3.2 Formation

Méthode : Pressage isostatique à froid (CIP) ou moulage par compression .

Équipement : Presse CIP (250300 MPa).

paramètre :

Pression : 250300 MPa, maintenir la pression pendant 60 secondes.

Moule : Moule en acier de haute précision (écart <±0,05 mm), lubrifié BN.

Densité de la pièce : 60-70 % de la densité théorique (8,7-10,5 g/cm³) .

Résultats : L'écart de taille des billettes était <±0,1 mm et le taux de fissures était <1%.

3.3 Frittage

Méthode : Frittage sous vide + HIP.

équipement :

Four de frittage sous vide (10⁻⁴ 10⁻⁵ Pa, éléments chauffants en molybdène).

Four HIP (Ar , 120150 MPa).

paramètre :

Déparaffinage :

Température : 200600°C, vitesse de chauffe 3°C/min.

Atmosphère : H₂ (O₂ < 5 ppm), débit 10 L/min.

Vide : 10⁻² Pa, carbone résiduel < 0,05 %.

frittage :

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

Température : 1350/1450°C, vitesse de chauffe 58°C/min.

Vide : 10^{-4} 10^{-5} Pa, garder au chaud pendant 23 heures.

HANCHE :

Température : 1350°C, pression 120 MPa (Ar).

Maintien au chaud : 12 heures, au frais à 15°C/min.

résultat :

Densité : 14,815,0 g/cm³ (GB /T 38502015, écart $\leq \pm 0,05$ g/cm³).

Porosité : $< 0,001$ % (A00B00C00, GB/T 51692013).

Dureté : 1800/2200 HV, taux de retrait 1518%.

3.4 Usinage de précision

Affûtage :

Equipement : Rectifieuse CNC, meule diamantée (granulométrie 510 μ m).

Paramètres : vitesse 3000 tr/min, avance 0,010,05 mm/passe, liquide de refroidissement (à base d'huile).

Résultats : Rayon de coupe < 5 μ m , Ra 0,10,2 μ m .

polissage :

Outils : Pâte à polir diamantée (13 μ m).

Paramètres : vitesse 800 tr/min, pression 0,3 MPa.

Résultat : Ra $< 0,1$ μ m , coefficient de frottement diminué de 20 %.

3.5 Revêtement

Méthode : PVD (Physical Vapor Deposition).

Equipement : Pulvérisation magnétron (cible Ti/Al/Cr, pureté $> 99,99\%$).

paramètre :

Revêtement : TiAlN (35 μ m , dureté 3000/3300 HV).

Vide : 10^{-4} Pa, température 300/400°C.

Polarisation : 100 V, gaz : Ar+N₂ (50 sccm).

Taux de dépôt : 1 μ m /h.

résultat :

Adhérence : > 80 N (test de rayure).

Résistance à la chaleur : 900/1100°C, durée de vie augmentée de 30/50%.

Coefficient de frottement : $< 0,3$, résistance à l'usure augmentée de 20/30 %.

3.6 Détection

Microstructure : MEB (grain 0,22 μ m) , XPS (écart de composition $\leq \pm 0,1$ % en poids).

performance :

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

Testeur de dureté : Écart < ±50 HV (ISO 6508).

Test d'usure : ASTM G65, taux d'usure < 0,05 mm³/h.

Résistance à la flexion : GB/T 38512015, 1,82,8 GPa .

Géométrie : CMM (machine à mesurer tridimensionnelle), écart de coupe <±0,005 mm.

4. Analyse des performances

paramètre	Outils en carbure	Acier rapide (HSS)
Dureté (HV)	18002200	800900
Résistance à la flexion (GPa)	1.82.8	34
Ténacité (KIC, MPa·m ^{1/2})	1015	2050
Résistance à l'usure (mm ³ /h)	<0,05	0,20,5
Résistance à la chaleur (°C)	8001000	500600
Vitesse de coupe (m/min)	5002000	50200
Durée de vie (minutes)	5002000	50200
Rugosité de surface (Ra, μm)	0.10.4	0,81,2

Points forts des performances :

Résistance à l'usure : Revêtement WC+TiAlN à grains ultrafins , perte d'usure < 0,05 mm³/h, durée de vie augmentée de 510 fois.

Stabilité à haute température : dureté >1200 HV à 800-1000°C, convient à la coupe à sec (liquide de refroidissement réduit de 50%).

Efficacité de coupe : vitesse 500-2000 m/min, augmentation de l'efficacité 50-100% (vs HSS).

Précision : Ra 0,10,4 μm , précision de traitement ± 0,01 mm.

5. Scénarios d'application

Les outils de coupe haute vitesse en carbure conviennent aux secteurs de l'aéronautique, de l'automobile, de l'usinage de moules et des équipements énergétiques. Voici des outils spécifiques, des données d'essai et des suggestions de sélection pour des conditions de travail courantes et actuelles :

Aérospatial

Matériaux : Alliage de titane (Ti6Al4V, HRC 36), Alliage à base de nickel (Inconel 718, HRC 45), CFRP.

Couteau :

Tournage du titane :

de tournage extérieur (plaquette indexable, ISO CNMG120408), WC6%Co (grain ultrafin, D50 0,20,5 μm , Cr3C2 0,5 % en poids), dureté 2000-2200 HV, revêtement PVD AlTiN (4 μm , dureté 3300 HV, résistance à la chaleur 1100°C). Angle de déviation principal 75°, angle d'arête de coupe 6°, rayon d'arête de coupe 0,02 mm, brise-copeaux 3D.

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

Procédé : broyage à billes pendant 20 heures, CIP 280 MPa, frittage 1400°C (10^{-5} Pa, 2,5 heures), HIP 1350°C (120 MPa, 1,5 heure), meulage (rayon d'arête $<5 \mu\text{m}$, $R_a 0,1 \mu\text{m}$), PVD AlTiN (350°C, adhérence $>100 \text{ N}$).

Paramètres de coupe : vitesse 800 m/min, avance 0,15 mm/r, profondeur de coupe 1,0 mm, coupe à sec.

Données de test : durée de vie 1200 minutes (HSS 150 minutes), $R_a 0,2 \mu\text{m}$, précision $\pm 0,01 \text{ mm}$, force de coupe 450 N (réduite de 25%), usure $<0,05 \text{ mm}^3/\text{h}$, température de la pointe de l'outil 850°C.

Recommandation de sélection : WC à grains ultrafins + faible teneur en Co (6 % en poids) + AlTiN, CNMG120408MF, angle de déviation principal 75°, coupe à sec ou MQL (0,1 L/h).

Perçage d'alliages haute température :

Foret monobloc ($\varnothing 10 \text{ mm}$, rapport profondeur/diamètre 5:1), WC12%Co (grain moyen-grossier, D50 $12 \mu\text{m}$, VC 0,5 % en poids), dureté 1600-1800 HV, revêtement PVD TiAlN ($4 \mu\text{m}$, résistant à la chaleur 1100°C). Angle au sommet 135°, angle d'hélice 30°, rayon de coupe 0,05 mm, trou de refroidissement interne $\varnothing 1 \text{ mm}$.

Procédé : broyage à billes pendant 22 heures, CIP 300 MPa, frittage 1450°C (10^{-5} Pa, 3 heures), HIP 1350°C (120 MPa, 2 heures), meulage (rayon d'arête $<5 \mu\text{m}$), PVD TiAlN (400°C, adhérence $>100 \text{ N}$).

Paramètres de coupe : vitesse 500 m/min, avance 0,05 mm/tr, profondeur de trou 50 mm, arrosage interne haute pression (20 bar, 5 L/min).

Données de test : durée de vie 800 minutes (HSS 100 minutes), $R_a 0,3 \mu\text{m}$, diamètre du trou $\pm 0,01 \text{ mm}$, force de coupe 550 N (réduite de 21%), usure $<0,05 \text{ mm}^3/\text{h}$, pas d'écaillage.

Recommandation de sélection : WC à grain moyen-grossier + haute teneur en Co (12 % en poids) + TiAlN, foret $\varnothing 10 \text{ mm}$ refroidi intérieurement, angle de pointe 135°, refroidissement interne haute pression.

Fraisage CFRP :

Fraise multident ($\varnothing 10 \text{ mm}$, 6 dents, denture décalée), WC8%Co (grain ultrafin, D50 $0,20,5 \mu\text{m}$, Cr3C2 0,5 % en poids), dureté 2000-2200 HV, revêtement PVD DLC ($3 \mu\text{m}$, dureté 3500 HV, frottement 0,08). Angle d'hélice 45°, angle d'inclinaison du tranchant +5°, rayon du tranchant 0,01 mm.

Procédé : broyage à billes pendant 20 heures, CIP 280 MPa, frittage 1400°C (10^{-5} Pa, 2,5 heures), HIP 1350°C (120 MPa, 1,5 heure), broyage ($R_a 0,08 \mu\text{m}$), PVD DLC (300°C, adhérence $>80 \text{ N}$).

Paramètres de coupe : vitesse 2000 m/min, avance 0,05 mm/dent, profondeur de coupe 2,0 mm, coupe à sec.

Données de test : durée de vie 1500 minutes (HSS 200 minutes), $R_a 0,15 \mu\text{m}$, pas de délaminage, force de coupe 200 N (réduite de 33%), usure $<0,03 \text{ mm}^3/\text{h}$, taux de délaminage $<1\%$.

Conseil de sélection : fraise à 6 arêtes grain ultra fin WC+DLC, $\varnothing 10 \text{ mm}$, angle d'hélice 45°, coupe à sec + évacuation des poussières.

Performances : Durée de vie 800-2000 minutes, efficacité augmentée de 50%, $R_a 0,15-0,4 \mu\text{m}$.

Cas : Usinage d'aubes de turbine (Ti6Al4V), vitesse 1200 m/min, durée de vie 1500 minutes,

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

précision $\pm 0,01$ mm.

Fabrication automobile :

Matériaux : acier haute résistance (HRC 4050), fonte (HB 200300).

Tournage des aciers à haute résistance :

Outil de tournage WC10%Co (CrN $5 \mu\text{m}$), vitesse 6001000 m/min.

Performances : Durée de vie 800-1500 minutes, Ra 0,1-0,3 μm .

Performances : Durée de vie 800-1500 minutes, coût de maintenance réduit de 20%.

Cas : Usinage du vilebrequin, vitesse 800 m/min, durée de vie 1200 minutes, rendement augmenté de 30%.

Moule traitement :

Matériaux : Acier à matrice (P20, HRC 3040), acier inoxydable (316L), impression 3D 316L.

Fraisage de l'acier inoxydable :

Fraise ($\varnothing$ 12 mm, 4 dents) , WC10%Ni (grain fin, D50 0,51 μm , Cr3C2 0,5 % en poids), dureté 1800-2000 HV, revêtement PVD CrN (5 μm , dureté 2200 HV, frottement 0,2) . Angle d'hélice 40°, rayon de coupe 0,03 mm, goujures polies (Ra <0,1 μm) .

Technologie

Broyage à billes pendant 18 h, pressage à 200 MPa, frittage à 1420°C (10^{-4} Pa, 2 h), HIP à 1350°C (120 MPa, 1,5 h), meulage (Ra 0,1 μm) , PVD CrN (300°C, adhérence >80 N).

Données de coupe

Vitesse 1000 m/min, avance 0,08 mm/dent, profondeur de coupe 0,5 mm, liquide de refroidissement à base d'eau (pH 8, 10 L/min).

Données de test

Durée de vie 1000 min (HSS 200 min), Ra 0,25 μm , précision $\pm 0,008$ mm, force de coupe 300 N (réduite de 25%), usure <0,04 mm³/h, pas d'arête rapportée .

Recommandations de sélection

Fraise à 4 arêtes WCNi (10 % en poids) + CrN , $\varnothing$ 12 mm, angle d'hélice 40°, coupe humide + nettoyage régulier.

Impression 3D 316L Finition :

Fraise à tête sphérique ($\varnothing$ 6 mm, 2 dents) , WC8%Co (grain ultrafin, D50 0,20,5 μm , VC 0,5 % en poids), dureté 2000-2200 HV, revêtement PVD TiAlN+CrN (5 μm , dureté 3200 HV, frottement 0,2). Rayon de la tête sphérique 3 mm, angle d'hélice 35°, rayon de coupe 0,02 mm, rainure polie (Ra <0,1 μm) .

Technologie

Broyage à billes pendant 20 h, CIP 280 MPa, frittage 1400°C (10^{-5} Pa, 2,5 h), HIP 1350°C (120 MPa, 1,5 h), meulage (Ra 0,1 μm) , PVD TiAlN+CrN (350°C, adhérence >100 N).

Données de coupe

Vitesse 1200 m/min, avance 0,03 mm/dent, profondeur de coupe 0,2 mm, MQL (0,1 L/h).

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

Données de test

Durée de vie 1200 min (HSS 250 min), Ra 0,15 μm (Ra initial 15 μm) , précision $\pm 0,005$ mm, force de coupe 250 N (réduite de 29%), usure $< 0,04$ mm³/h, pas de colmatage.

Recommandations de sélection

Fraise à boulets à 2 dents, grain ultrafin WC+TiAlN+ CrN , Ø 6 mm, angle d'hélice 35°, MQL+ fraisage en couches.

performance

Durée de vie : 1000-2000 minutes, précision : $\pm 0,005$ -0,008 mm.

Cas

Usinage par moulage par injection (316L), vitesse 1000 m/min, durée de vie 1800 minutes, Ra 0,2 μm .

Équipements énergétiques :

Matériaux : alliage haute température (GH4169), CFRP.

Couteau :

Fraisage CFRP : fraise WC8%Co (Ø 10 mm, DLC 3 μm) , vitesse 2000 m/min, durée de vie 1500 minutes, pas de délaminage.

Performances : Durée de vie de 1000 à 2000 minutes, pas de délaminage/ écaillage.

Cas : Usinage de pales d'éoliennes (CFRP), vitesse 1500 m/min, durée de vie 2000 minutes.

6. Suggestions d'optimisation

Optimisation des matériaux :

Alliage de titane : WC à grains ultrafins (D50 0,20,5 μm) , Co 6 % en poids , AlTiN 4 μm , résistant à la chaleur 1100°C.

Acier inoxydable : WCNi (10 % en poids) , Cr₃C₂ 0,5 % en poids , CrN 5 μm , résistance à la corrosion $< 0,01$ mm/an.

Alliage haute température : WC à grains moyens grossiers (12 μm) , Co 12 % en poids , TiAlN 4 μm , KIC > 14 MPa·m^{1/2} .

CFRP : WC à grains ultrafins (0,20,5 μm) , Co 8 % en poids , DLC 3 μm , frottement $< 0,08$.

Impression 3D métal : WC à grain ultrafin (0,20,5 μm) , Co 8 % en poids , TiAlN+CrN 5 μm , précision $\pm 0,005$ mm.

Usage général : Cr₃C₂/VC 0,5 % en poids , dureté augmentée de 510 %.

Optimisation des processus :

Frittage : HIP 1350°C, 120 MPa, porosité $< 0,001\%$, consistance augmentée de 10%.

Rectification : Rectifieuse CNC, meule diamantée (58 μm) , rayon de coupe < 5 μm , Ra $< 0,1$ μm .

revêtement :

AlTiN (4 μm , 350°C, polarisation 100 V), résistance à la chaleur augmentée de 20%.

CrN (5 μm , 300°C, polarisation 80 V), résistance à la corrosion augmentée de 30%.

DLC (3 μm , 300°C, polarisation 120 V), réduction de frottement 50%.

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

Impression 3D : moulage SLM d'outils complexes (tels que des canaux de refroidissement internes), temps de cycle réduit de 20%, précision de $\pm 0,01$ mm.

Optimisation des équipements :

Four de frittage : contrôle de température $\pm 3^{\circ}\text{C}$, vide 10^{-5} Pa.

Rectifieuse CNC : meule diamantée, écart $< \pm 0,005$ mm.

Équipement de revêtement : taux de dépôt $12 \mu\text{m/h}$, écart d'épaisseur $< \pm 0,1 \mu\text{m}$.

Adaptation des conditions de travail :

Alliage de titane : découpe à sec, revêtement AlTiN, vitesse 800-1200 m/min, angle de déviation principal 75° .

Acier inoxydable : découpe humide, revêtement CrN, vitesse 600-1000 m/min, angle d'hélice 40° .

Alliage haute température : refroidissement interne (20 bar), revêtement TiAlN, vitesse 500-800 m/min, angle au sommet 135° .

CFRP : découpe à sec, revêtement DLC, vitesse 1500-2000 m/min, dents décalées.

Impression 3D métal : MQL ($0,1 \text{ L/h}$), revêtement TiAlN+CrN, vitesse 1000-1200 m/min, outil à bout sphérique.

Tests et vérifications :

Microstructure : MEB (grain $0,22 \mu\text{m}$), EBSD (contrainte aux joints de grains $< 5\%$).

Performances : ASTM G65 (taux d'usure $< 0,030,05 \text{ mm}^3/\text{h}$), dureté haute température ($> 1200 \text{ HV}$, 900°C).

Essai de coupe :

Force de coupe : 200550 N (en baisse de 2033%).

Durée de vie : 800 à 2000 minutes (augmentée de 4,88 fois).

Surface : $R_a 0,150,3 \mu\text{m}$, précision $\pm 0,0050,01$ mm.

Rupture : $VB < 0,10,2$ mm, pas d'écaillage/délaminage.

7. Normes et spécifications

GB/T 183762014 : Porosité $< 0,01\%$, uniformité $> 95\%$.

GB/T 38502015 : Densité $14,515,0 \text{ g/cm}^3$, écart $< \pm 0,1 \text{ g/cm}^3$.

GB/T 38512015 : Résistance à la flexion $1,82,8 \text{ GPa}$.

GB/T 79972017 : Dureté $1400-2200 \text{ HV}$, écart $< \pm 50 \text{ HV}$.

ASTM G 65 : Taux d'usure $< 0,05 \text{ mm}^3/\text{h}$.

ISO 6508 : Essai de dureté, écart $< \pm 50 \text{ HV}$.

ISO 1832 : Géométrie de l'outil, écart de coupe $< \pm 0,01$ mm.

ISO 8688 : Test de durée de vie de l'outil, temps de coupe > 500 minutes.

8. Conclusion

L'outil de coupe à grande vitesse en carbure cimenté atteint une dureté élevée (1800-2200 HV), une résistance à l'usure (perte d'usure $< 0,03-0,05 \text{ mm}^3/\text{h}$), une dureté rouge à haute température (800-1000°C) et une stabilité de coupe (durée de vie 800-2000 minutes) en optimisant les matériaux.

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

(grain ultrafin WC 0,2-0,5 μ m , faible teneur en Co 68 % en poids , revêtement TiAlN / CrN / DLC 35 μ m) et des procédés de fabrication avancés (frittage HIP 1350°C, 120 MPa, revêtement PVD 300-400°C). Français L'outil est adapté à l'aérospatiale (alliage de titane, alliage à base de nickel, PRFC), à l'automobile (acier à haute résistance), au moulage (acier inoxydable, métal d'impression 3D) et à l'énergie (PRFC) et à d'autres domaines, avec une vitesse de coupe de 500 à 2000 m/min, une augmentation de l'efficacité d'usinage de 50 à 100 %, une précision de $\pm 0,005$ à 0,01 mm et un Ra de 0,15 à 0,4 μ m . L'optimisation des grains ultrafins, des revêtements composites, de l'impression 3D et de la rectification de précision peut encore réduire les coûts (100 500 yuans par pièce) et améliorer les performances. Les défis résident dans la difficulté d'usinage (les coûts de rectification au diamant augmentent de 20 %) et l'adhérence du revêtement (> 80 N requis).

CTIA GROUP LTD utilise de la poudre de WC nano (D50 0,20,5 μ m) , un frittage HIP (porosité < 0,001 %) et un revêtement PVD multicouche (TiAlN + CrN , 57 μ m) pour développer des outils de tournage, des fraises et des forets hautes performances répondant aux besoins de l'aéronautique (durée de vie > 1 500 minutes), de l'automobile (efficacité accrue de 30 %) et du traitement des moules (précision $\pm 0,005$ mm). Les produits sont vérifiés par MEB, ASTM G65 et ISO 1832 pour garantir des performances stables.

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

appendice:

Fraises à boulets en carbure

1. Aperçu

Les fraises boules en carbure sont des outils de fraisage dont le corps ou la lame est en carbure de tungstène (tel que WC-Co, WC-Ni). La tête de coupe est sphérique et convient à l'usinage de surfaces tridimensionnelles complexes, de cavités, de moules et de pièces de précision. Sa dureté élevée (HV1600-2000), son excellente résistance à l'usure et sa stabilité à haute température (résistance de rétention de 600 à 800 °C) la rendent idéale pour l'usinage de l'acier, de la fonte, de l'acier inoxydable, des alliages d'aluminium et des alliages haute température, répondant ainsi aux besoins des industries aéronautique, automobile, de la fabrication de moules et médicale en matière d'usinage de surface de haute précision (IT6-IT7) .

1. Matériaux et fabrication

Composition du matériau :

Il est principalement composé de carbure de tungstène (WC, représentant 80 à 90 %) et de liants (tels que Co et Ni, représentant 5 à 15 %), auxquels s'ajoutent TiC et TaC pour améliorer la résistance à l'usure. Une teneur élevée en Co (comme WC-10Co) améliore la ténacité et convient à la coupe intermittente ; les alliages à base de Ni sont résistants à la corrosion et adaptés à l'usinage par voie humide.

Procédé de fabrication :

Métallurgie des poudres

Mélanger les poudres de WC et de Co (taille des particules 0,4–1,5 μm), presser le moule (pression 300–500 MPa) et fritter sous vide à 1350–1450 °C pour obtenir une dureté de HV1700–1900.

Rectification de précision

La tête de coupe sphérique et la rainure en spirale sont traitées par une meule diamantée, avec une netteté des bords < 5 μm et une rugosité de surface $R_a < 0,2 \mu\text{m}$, garantissant une précision de coupe et une élimination des copeaux en douceur.

Technologie de revêtement

Application d'un revêtement PVD (tel que TiAlN, AlCrN, DLC) d'une épaisseur de 2 à 4 μm peut réduire le coefficient de frottement à 0,15-0,3 et prolonger la durée de vie de l'outil de 50 à 100 %.

Avantages

Par rapport aux fraises à boulets en acier rapide, les fraises à boulets en carbure ont une vitesse de coupe 2 à 3 fois plus élevée (50 à 200 m/min) et une durée de vie 3 à 5 fois plus longue.

3. Types et applications

Fraises à boulets standard

Diamètre 2-20 mm, 2-4 lames, adapté au traitement des cavités de moules et des surfaces courbes,

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

comme le moule de lampe automobile (précision IT7).

Fraise à tête sphérique à long col

Rapport hauteur/largeur élevé ($L/D > 5$), utilisé pour le traitement des cavités profondes, comme les moules de pales d'aviation (profondeur 50-100 mm).

Micro-fraises à boulets

Diamètre 0,1–2 mm, adapté à l'usinage de précision, comme les implants médicaux (rugosité de surface $Ra < 0,2 \mu m$).

Fraise à boulets haute dureté

Matériaux de dureté d'usinage HRC50-65, adaptés à l'acier moulé et aux alliages à haute température.

Exemples d'application :

Aéronautique : Traitement d'aubes de turbine en alliage de titane, vitesse de coupe 80 m/min, tolérance $< 5 \mu m$.

Industrie automobile : Fraisage de surfaces de moules en plastique, avec une production annuelle de plus de 5 millions de pièces et une durée de vie de 20 000 pièces/ lame.

Industrie médicale : Usinage d'implants orthopédiques, rugosité de surface $Ra < 0,1 \mu m$, précision IT6.

4. Caractéristiques techniques

Haute efficacité : vitesse de coupe de 50 à 200 m/min, vitesse d'avance de 0,02 à 0,2 mm/dent, efficacité de traitement augmentée de 30 à 50 %.

Haute précision : tolérance dimensionnelle $< 5 \mu m$, rugosité de surface $Ra 0,2-0,4 \mu m$, conforme aux normes ISO 1832.

Durabilité : Les fraises à boulets revêtues ont une durée de vie de 5 000 à 10 000 pièces et la fréquence de changement d'outils est réduite de 50 %.

Recyclabilité : Les outils usagés peuvent être recyclés par fusion du zinc ou par des méthodes chimiques, avec un taux de récupération du tungstène de $> 90 \%$ et une réduction des coûts de 30 à 40 %.

5. Tendances de développement

Optimisation intelligente

Associé à l'IA pour optimiser le rayon de la tête de l'outil ($R0,5-R10$) et le chemin de coupe, l'erreur d'usinage est réduite de 25 %.

Fabrication verte

Rechercher et développer du carbure cémenté à faible teneur en Co ($< 5 \%$) pour réduire l'impact environnemental ; promouvoir la technologie de recyclage électrochimique pour réduire les émissions de liquides résiduels de 60 %.

Revêtements avancés

Développer des revêtements nano-composites (tels que TiAlN /DLC) pour augmenter la résistance à l'usure de 60 % et prolonger la durée de vie de 2 fois.

Conception haute performance

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

L'angle d'hélice optimisé (30–40°) et les rainures à copeaux réduisent les forces de coupe de 20 %, ce qui le rend adapté à l'usinage à grande vitesse et à sec.

Grâce à leur dureté élevée, leur résistance à l'usure et leur haute précision, les fraises boules en carbure sont devenues des outils incontournables pour l'usinage de surfaces complexes et de précision. Elles sont largement utilisées dans les secteurs de l'aéronautique, de l'automobile, du moulage et de la médecine. À l'avenir, grâce à une optimisation intelligente, un recyclage écologique et une technologie de revêtement avancée, les fraises boules en carbure amélioreront encore l'efficacité de l'usinage, réduiront les coûts et soutiendront le développement durable, contribuant ainsi à renforcer la compétitivité de l'industrie manufacturière haut de gamme chinoise.

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

Copyright© 2024 CTIA All Rights Reserved
标准文件版本号 CTIAQCD-MA-E/P 2024 版
www.ctia.com.cn

电话/TEL: 0086 592 512 9696
CTIAQCD-MA-E/P 2018-2024V
sales@chinatungsten.com

appendice:

Fraises en carbure

1. Aperçu

Les fraises en carbure sont des outils de fraisage verticaux dont le corps ou la lame est en carbure à base de tungstène (tel que WC-Co, WC-Ni). Dotées de multiples arêtes de coupe, elles sont utilisées pour usiner des plans, des rainures, des gradins, des cavités et des surfaces courbes complexes. Leur dureté élevée (HV1600-2000), leur excellente résistance à l'usure et leur stabilité à haute température (résistance de rétention de 600 à 800 °C) les rendent idéales pour l'usinage de l'acier, de la fonte, de l'acier inoxydable, des alliages d'aluminium et des alliages haute température. Elles répondent ainsi aux besoins des industries aéronautique, automobile, de la fabrication de moules et des machines de précision, en matière d'usinage haute précision (IT6-IT8) et haute efficacité.

2. Matériaux et fabrication

Composition du matériau

Il est principalement composé de carbure de tungstène (WC, représentant 80 à 90 %) et de liants (tels que Co et Ni, représentant 5 à 15 %), auxquels s'ajoutent TiC et TaC pour améliorer la résistance à l'usure. Une teneur élevée en Co (comme WC-10Co) augmente la ténacité et convient à la coupe intermittente ; les alliages à base de Ni sont résistants à la corrosion et adaptés à l'usinage par voie humide.

Processus de fabrication

Métallurgie des poudres : mélange de poudres de WC et de Co (granulométrie de 0,5 à 2 µm), moulage sous pression (pression de 300 à 500 MPa), frittage sous vide à 1 350 à 1 450 °C, et la dureté atteint HV1 700 à 1 900.

Rectification de précision : une meule diamantée est utilisée pour traiter la lame et la rainure en spirale, avec une netteté des bords < 5 µm et une rugosité de surface Ra < 0,2 µm, assurant une évacuation fluide des copeaux.

Technologie de revêtement : Appliquer un revêtement PVD ou CVD (tel que TiAlN, AlCrN, TiSiN) d'une épaisseur de 2 à 5 µm, réduit le coefficient de frottement à 0,2 à 0,3 et prolonge la durée de vie de l'outil de 50 à 100 %.

Avantages : Les fraises en carbure coupent 2 à 4 fois plus vite (50 à 250 m/min) et durent 3 à 5 fois plus longtemps que les fraises HSS.

3. Types et applications

Fraises plates en carbure

Pour le traitement des plans et des rainures, adapté aux cavités de moules automobiles (profondeur 10-50 mm, précision IT7).

Fraises à bout rond en carbure

La lame d'arc convient au traitement des surfaces courbes et des contours et est utilisée dans les

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

pales de turbine d'aviation avec une précision de IT6.

Fraises à bout sphérique en carbure

Traitement de surfaces 3D complexes, telles que des moules d'implants médicaux, avec une rugosité de surface $Ra < 0,4 \mu m$.

Fraises d'ébauche en carbure

Le grand angle d'hélice ($35-45^\circ$) et le bord en forme de vague conviennent à l'élimination efficace des matériaux, tels que les pièces de fuselage en alliage d'aluminium.

Exemples d'application :

Industrie automobile : Usinage de rainures de carters de boîtes de vitesses, avec une production annuelle de plus de 10 millions de pièces et une durée de vie de 50 000 pièces/lame.

Aéronautique : Fraisage de boîtier en alliage de titane, vitesse de coupe 100 m/min, tolérance $< 8 \mu m$.

Fabrication de moules : le traitement d'acier de moule à haute dureté (HRC50-60) peut augmenter la durée de vie de l'outil de 40 %.

2. Caractéristiques techniques

Haute efficacité : vitesse de coupe de 50 à 250 m/min, vitesse d'avance de 0,05 à 0,3 mm/dent, efficacité d'usinage augmentée de 40 à 60 %.

Haute précision : tolérance dimensionnelle $< 8 \mu m$, rugosité de surface $Ra 0,4-0,8 \mu m$, conforme aux normes ISO 1832.

Durabilité : Les fraises revêtues ont une durée de vie de 5 000 à 15 000 pièces et la fréquence de changement d'outils est réduite de 50 %.

Recyclabilité : Les outils usagés peuvent être recyclés par fusion du zinc ou par des méthodes chimiques, avec un taux de récupération du tungstène de $> 90\%$ et une réduction des coûts de 30 à 40 %.

5. Tendances de développement

Optimisation intelligente : Combiné à l'IA pour optimiser le nombre d'arêtes (2 à 6 arêtes) et les paramètres de coupe, l'erreur d'usinage est réduite de 30 %.

Fabrication verte : Recherche et développement de carbure cémenté à faible teneur en Co ($< 5\%$) pour réduire l'impact environnemental ; promotion de la technologie de recyclage des liquides ioniques pour réduire les émissions de liquides résiduels de 60 %.

Revêtements avancés : Développer des revêtements nanocomposites (tels que TiAlN /DLC) qui augmentent la résistance à l'usure de 60 % et prolongent la durée de vie de 2 fois.

Conception haute performance : l'angle d'hélice optimisé ($30-45^\circ$) et les rainures à copeaux réduisent les forces de coupe de 20 %, adaptées à l'usinage à grande vitesse.

Les fraises en carbure sont devenues des outils de base pour le fraisage grâce à leur dureté élevée, leur résistance à l'usure et leur haute précision. Elles sont largement utilisées dans les secteurs de l'aéronautique, de l'automobile et de la fabrication de moules. À l'avenir, grâce à une optimisation intelligente, un recyclage écologique et une technologie de revêtement avancée, les fraises en carbure amélioreront encore l'efficacité de l'usinage, réduiront les coûts et soutiendront le

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

développement durable, contribuant ainsi à renforcer la compétitivité de l'industrie manufacturière haut de gamme chinoise.

www.chinatungsten.com

www.chinatungsten.com

www.chinatungsten.com

www.chinatungsten.com

www.chinatungsten.com

www.chinatungsten.com

www.chinatungsten.com

www.chinatungsten.com

www.chinatungsten.com

www.chinatungsten.com

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

Copyright© 2024 CTIA All Rights Reserved
标准文件版本号 CTIAQCD-MA-E/P 2024 版
www.ctia.com.cn

电话/TEL: 0086 592 512 9696
CTIAQCD-MA-E/P 2018-2024V
sales@chinatungsten.com

appendice:

Fraise multi-dents en carbure

1. Fraise multi-dents en carbure

Les fraises multident en carbure sont des outils de coupe dont le corps ou la lame est en carbure à base de tungstène (tel que WC-Co, WC-Ni), avec plusieurs dents de coupe. Elles sont largement utilisées pour le fraisage de plans, de rainures, de marches, de surfaces courbes et de surfaces complexes. Leur dureté élevée (HV1600-2000), leur excellente résistance à l'usure et leur stabilité à haute température (résistance à 600-800 °C) les rendent idéales pour l'usinage de l'acier, de la fonte, de l'acier inoxydable, des alliages d'aluminium et des alliages haute température, répondant ainsi aux besoins des secteurs de l'aérospatiale, de l'automobile, de la fabrication de moules et de l'énergie en matière d'usinage de haute précision (IT6-IT8) et de rendement élevé.

2. Matériaux et fabrication des fraises multi-dents en carbure cimenté

Composition du matériau : Principalement composé de carbure de tungstène (WC, représentant 80 à 90 %) et d'un liant (Co et Ni, représentant 5 à 15 %), avec ajout de TiC et de TaC pour une meilleure résistance à l'usure. Une teneur élevée en Co (WC-10Co, par exemple) améliore la ténacité et convient au fraisage intermittent. Les alliages à base de Ni sont résistants à la corrosion et conviennent à l'usinage humide.

Procédé de fabrication :

Métallurgie des poudres : mélange de poudres de WC et de Co (granulométrie de 0,5 à 2 µm), moulage sous pression (pression de 300 à 500 MPa), frittage sous vide à 1 350 à 1 450 °C, et la dureté atteint HV1 700 à 1 900.

Rectification de précision : une meule CBN ou diamantée est utilisée pour traiter les dents et les rainures, avec une netteté des bords < 5 µm et une rugosité de surface Ra < 0,2 µm, garantissant une évacuation fluide des copeaux.

Technologie de revêtement : Appliquer un revêtement PVD ou CVD (tel que TiAlN, AlCrN, TiSiN) d'une épaisseur de 2 à 5 µm, réduit le coefficient de frottement à 0,2 à 0,3 et prolonge la durée de vie de l'outil de 50 à 100 %.

Avantages : Par rapport aux fraises en acier rapide, les fraises multi-dents en carbure ont une vitesse de coupe 2 à 4 fois supérieure (50 à 250 m/min) et une durée de vie 3 à 5 fois plus longue.

3. Types et applications des fraises multi-dents en carbure

Fraises multi-dents en carbure

La conception multi-dents (4 à 8 dents) convient au traitement latéral et aux rainures, comme les cavités de moules automobiles (profondeur 10 à 50 mm, précision IT7).

Fraise à surfacer multi-dents en carbure

Grand diamètre et dents multiples (6-12 dents) pour un traitement efficace des surfaces planes, adapté aux panneaux d'ailes en alliage d'aluminium aéronautique (rugosité de surface Ra<0,8µm).

Fraise à nez rond multi-dents en carbure

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

La lame d'arc convient au traitement de surfaces courbes et est utilisée dans les aubes de turbine avec une précision de IT6.

Fraise à rainurer multi-dents en carbure

Usinage de rainures de clavette de haute précision, telles que les arbres principaux d'éoliennes (largeur de fente 5–20 mm, tolérance < 10 µm).

Exemples d'application :

Industrie automobile : Usinage de plans de culasses de moteurs, avec une production annuelle de plus de 20 millions de pièces et une durée de vie de 50 000 pièces/ lame.

Aérospatiale : Fraisage de boîtier en alliage de titane, vitesse de coupe 100 m/min, rugosité de surface $Ra < 0,4 \mu m$.

Fabrication de moules : le traitement d'acier de moule à haute dureté (HRC50-60) peut augmenter la durée de vie de l'outil de 40 %.

4. Caractéristiques techniques de la fraise multi-dents en carbure

Haute efficacité : vitesse de coupe de 50 à 250 m/min, vitesse d'avance de 0,05 à 0,3 mm/dent, efficacité d'usinage augmentée de 40 à 60 %.

Haute précision : tolérance dimensionnelle < 8 µm, rugosité de surface $Ra 0,4-0,8 \mu m$, conforme aux normes ISO 1832.

Durabilité : La durée de vie des fraises revêtues est de 5 000 à 15 000 pièces et la fréquence des changements d'outils est réduite de 50 %.

Recyclabilité : Les outils usagés peuvent être recyclés par fusion du zinc ou par des méthodes chimiques, avec un taux de récupération du tungstène de > 90 % et une réduction des coûts de 30 à 40 %.

5. Tendance de développement des fraises multi-dents en carbure cémenté

Optimisation intelligente

Combiné à l'optimisation par IA du nombre de dents (4 à 12 dents) et des paramètres de coupe, l'erreur d'usinage est réduite de 30 %.

Fabrication verte

Développer du carbure cémenté à faible teneur en Co (< 5 %) pour réduire l'impact environnemental ; promouvoir la technologie de recyclage des liquides ioniques pour réduire les émissions de liquides résiduels de 60 %.

Revêtements avancés

Développer des revêtements nano-composites (tels que $TiAlN / Si_3N_4$) pour augmenter la résistance à l'usure de 60 % et prolonger la durée de vie de 2 fois.

Conception modulaire

Promouvoir la normalisation des plaquettes indexables et des têtes de coupe (ISO 1832), réduisant ainsi les coûts d'inventaire de 20 %.

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

Les fraises multidentés en carbure sont devenues des outils incontournables pour le fraisage grâce à leur dureté élevée, leur résistance à l'usure et leur haute précision. Elles sont largement utilisées dans les secteurs de l'aéronautique, de l'automobile et de la fabrication de moules. À l'avenir, grâce à une optimisation intelligente, un recyclage écologique et une technologie de revêtement avancée, les fraises multidentés en carbure amélioreront encore l'efficacité de l'usinage, réduiront les coûts et soutiendront le développement durable, contribuant ainsi à renforcer la compétitivité de l'industrie manufacturière haut de gamme chinoise.

appendice:

Foret monobloc en carbure

1. Présentation du foret monobloc en carbure

Les forets en carbure monobloc sont des outils de perçage fabriqués à partir de carbure de tungstène (tel que WC-Co, WC-Ni) comme matériau principal. Ils sont largement utilisés pour l'usinage de trous, tels que le perçage, l'alésage et le fraisage. Leur dureté élevée (HV1600-2000), leur excellente résistance à l'usure et leur stabilité à haute température (600-800 °C pour une résistance optimale) les rendent adaptés à l'usinage de l'acier, de la fonte, de l'acier inoxydable, des alliages d'aluminium et des alliages haute température. Ils répondent ainsi aux besoins des secteurs de l'aérospatiale, de l'automobile, de la fabrication de moules et de l'énergie en matière d'usinage de trous de haute précision (IT7-IT9) et de haute efficacité.

2. Matériaux et fabrication des forets en carbure cémenté

Composition du matériau

Il est principalement composé de carbure de tungstène (WC, représentant 85 à 95 %) et d'un liant (tel que le Co, représentant 5 à 12 %), auquel sont ajoutés du TiC et du VC pour améliorer la résistance à l'usure. Une teneur élevée en Co (comme le WC-10Co) améliore la ténacité et convient à la coupe intermittente ; une faible teneur en Co (comme le WC-6Co) améliore la dureté et convient à l'usinage à grande vitesse.

Processus de fabrication

Métallurgie des poudres : mélange de poudres de WC et de Co (granulométrie de 0,4 à 1,5 µm), moulage sous pression (pression de 300 à 500 MPa), frittage sous vide à 1350 à 1450 °C, et la dureté atteint HV1800 à 2000.

Meulage de précision : la meule diamantée est utilisée pour traiter le bord du foret et la rainure en spirale, la netteté du bord est < 5 µm et la rugosité de surface Ra est < 0,2 µm, assurant une évacuation fluide des copeaux.

Technologie de revêtement : Application de revêtement PVD (tel que TiAlN , AlCrN) d'une épaisseur de 2 à 4 µm, réduit le coefficient de frottement à 0,2 à 0,3 et améliore la résistance à l'usure de 50 à 80 %.

Avantages

Comparés aux forets en acier rapide, les forets monoblocs en carbure ont une vitesse de coupe 2 à 3 fois supérieure (30 à 150 m/min) et une durée de vie 4 à 6 fois plus longue.

3. Types et applications des forets monoblocs en carbure

Foret hélicoïdal monobloc en carbure

Conception en spirale standard, adaptée au traitement général des trous, tels que les trous de bloc-cylindres de moteur automobile (diamètre 5-50 mm, précision IT8).

Foret à centrer monobloc en carbure

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

Utilisé pour le positionnement et le pré-perçage, le traitement des trous centraux des pièces d'aviation, précision IT7.

Foret pour trous profonds en carbure massif

Rapport hauteur/largeur élevé ($L/D > 5$), avec canal de refroidissement interne, traitement de trous profonds de corps de vannes hydrauliques (profondeur 100-500 mm).

Foret étagé intégral en carbure

Traitement complet des trous à plusieurs niveaux en une seule fois, adapté aux pièces moulées et augmente l'efficacité de 30 %.

Cas d'application du foret intégral en carbure cimenté :

Industrie automobile : Usinage de trous de carter de boîte de vitesses, avec une production annuelle de plus de 100 millions de pièces et une durée de vie de perçage de 20 000 trous/ lame.

Aérospatiale : Perçage de trous de boîtier en alliage de titane, vitesse de coupe 60 m/min, tolérance de diamètre de trou $< 10 \mu\text{m}$.

Industrie énergétique : Traitement des trous de broche d'éolienne, rugosité de surface $Ra < 0,8 \mu\text{m}$, durée de vie augmentée de 50 %.

4. Caractéristiques techniques des forets intégraux en carbure

Haute efficacité : vitesse de coupe de 30 à 150 m/min, vitesse d'avance de 0,05 à 0,3 mm/tr, efficacité d'usinage augmentée de 40 %.

Haute précision : tolérance d'ouverture $< 8 \mu\text{m}$, erreur de circularité $< 5 \mu\text{m}$, conforme aux normes ISO 8015.

Durabilité : les forets revêtus ont une durée de vie de 10 000 à 20 000 trous et la fréquence de changement d'outil est réduite de 60 %.

Recyclabilité : Les forets usagés peuvent être recyclés par fusion du zinc ou par des méthodes chimiques, avec un taux de récupération du tungstène de $> 90 \%$ et une réduction des coûts de 30 à 40 %.

5. Tendances de développement du foret intégral en carbure cimenté

Conception intelligente : combinée à l'IA pour optimiser l'angle d'hélice ($25-35^\circ$) et les paramètres de coupe, l'erreur d'usinage est réduite de 25 %.

Fabrication verte : Rechercher et développer du carbure cimenté à faible teneur en Co ($< 5 \%$) pour réduire l'impact environnemental ; promouvoir la technologie de recyclage électrochimique pour réduire les émissions de liquides résiduels de 60 %.

Revêtements avancés : Développer des revêtements nano-multicouches (tels que TiAlN /DLC), qui améliorent la résistance à l'usure de 60 % et prolongent la durée de vie de 2 fois.

Technologie de refroidissement interne : conception optimisée du canal de refroidissement interne (pression 10-20 bar), température de coupe réduite de 30 %, adaptée au traitement à sec ou à lubrification minimale.

Grâce à leur dureté élevée, leur résistance à l'usure et leur haute précision, les forets en carbure monobloc sont largement utilisés dans les secteurs de l'aérospatiale, de l'automobile et de l'énergie.

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

À l'avenir, grâce à une conception intelligente, un recyclage écologique et une technologie de revêtement avancée, ils amélioreront encore l'efficacité de l'usinage, réduiront les coûts et soutiendront le développement durable, contribuant ainsi à renforcer la compétitivité de l'industrie manufacturière haut de gamme chinoise.

appendice:

Outil de tournage extérieur en carbure

1. Présentation des outils de tournage extérieurs en carbure

Les outils de tournage extérieur en carbure sont des outils de coupe dont la tête est en carbure de tungstène (tel que WC-Co, WC-Ni). Ils sont largement utilisés pour le tournage de surfaces cylindriques externes, de faces frontales, de paliers et de rainures. Leur dureté élevée (HV1600-2000), leur excellente résistance à l'usure et leur stabilité à haute température (résistance à 600-800 °C) les rendent adaptés à l'usinage de l'acier au carbone, de l'acier allié, de l'acier inoxydable, de la fonte et des alliages haute température. Ils répondent ainsi aux besoins des industries automobile, aéronautique, de la fabrication de moules et des machines générales en matière d'usinage de haute précision (IT6-IT8) et de rendement élevé.

2. Matériaux et fabrication des outils de tournage extérieur en carbure cémenté

Composition du matériau : Principalement composé de carbure de tungstène (WC, représentant 80 à 90 %) et d'un liant (tel que Co, Ni, représentant 5 à 15 %), auquel on ajoute du TiC et du TaC pour améliorer la résistance à l'usure. Le Co améliore la ténacité (comme le WC-8Co pour l'ébauche) et le Ni améliore la résistance à la corrosion (adapté à la coupe humide).

Procédé de fabrication :

Métallurgie des poudres : mélange de poudres de WC et de Co (granulométrie de 0,5 à 2 µm), moulage sous pression (pression de 200 à 400 MPa), frittage sous vide à 1 350 à 1 450 °C, et la dureté atteint HV1 700 à 1 900.

Rectification de précision : une meule diamantée est utilisée pour traiter la tête de coupe, avec une netteté des bords < 5 µm et une rugosité de surface Ra < 0,2 µm, garantissant la précision de la coupe.

Technologie de revêtement : Appliquer un revêtement PVD ou CVD (tel que TiN , TiCN , Al2O3) d'une épaisseur de 2 à 6 µm, réduisent le coefficient de frottement à 0,2 à 0,3 et prolongent la durée de vie de l'outil de 50 à 80 %.

Avantages : Par rapport aux outils de tournage en acier rapide, les outils de tournage en carbure ont une vitesse de coupe 2 à 4 fois supérieure (50 à 200 m/min) et une durée de vie 3 à 6 fois plus longue.

3. Types et applications des outils de tournage extérieur en carbure cémenté

Outil de tournage extérieur en carbure - outil de tournage indexable

Les lames sont remplaçables et très polyvalentes, ce qui les rend adaptées à la production de masse, comme l'usinage de vilebrequins automobiles (diamètre 50-200 mm, précision IT7).

Outil de tournage extérieur en carbure - outil de tournage soudé

La tête de coupe est soudée au corps de coupe en acier, ce qui est peu coûteux et convient aux usines de traitement de petite et moyenne taille pour traiter le cercle extérieur du corps de la pompe.

Outil de tournage extérieur en carbure - outil de tournage intégré

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

La tête de coupe est intégrée au corps de coupe, ce qui convient au traitement de haute précision, comme les arbres de turbine d'aviation (diamètre 20-100 mm, précision IT6).

Exemples d'application :

Industrie automobile : Usinage de cylindres de moteurs, avec une production annuelle de plus de 50 millions de pièces et une durée de vie de 10 000 pièces/ lame.

Aéronautique : Tournage de disque de turbine en alliage de titane, vitesse de coupe 80 m/min, rugosité de surface $Ra < 0,8 \mu m$.

Fabrication de moules : le traitement d'acier de moule à haute dureté (HRC50-60) peut augmenter la durée de vie de l'outil de 40 %.

4. Caractéristiques techniques des outils de tournage extérieur en carbure cémenté

Haute efficacité : vitesse de coupe de 50 à 200 m/min, vitesse d'avance de 0,1 à 0,4 mm/tr, efficacité d'usinage augmentée de 30 à 50 %.

Haute précision : tolérance dimensionnelle $< 10 \mu m$, rugosité de surface $Ra 0,4-0,8 \mu m$, conforme aux normes ISO 1832.

Durabilité : La durée de vie des outils de tournage revêtus atteint 5 000 à 10 000 pièces et la fréquence de changement d'outils est réduite de 60 %.

Recyclabilité : Les lames usagées peuvent être recyclées par fusion du zinc ou par des méthodes chimiques, avec un taux de récupération du tungstène de $> 90 \%$ et une réduction des coûts de 30 à 40 %.

5. Tendances de développement des outils de tournage extérieur en carbure cémenté

Optimisation intelligente : combinée à l'IA pour optimiser les paramètres de coupe (tels que l'angle de déviation principal et la profondeur de coupe), l'efficacité du traitement est améliorée de 20 %.

Fabrication verte : Rechercher et développer du carbure cémenté à faible teneur en Co ($< 5 \%$) pour réduire l'impact environnemental ; promouvoir la technologie de recyclage électrochimique pour réduire les émissions de liquides résiduels de 50 %.

Revêtements avancés : Développer des revêtements nanocomposites (tels que $TiAlN / Si_3N_4$) qui augmentent la résistance à l'usure de 60 % et prolongent la durée de vie de 2 fois.

Conception modulaire : Favorise la standardisation des plaquettes indexables (ISO 1832), réduisant ainsi les coûts d'inventaire des outils de 25 %.

Grâce à leur dureté élevée, leur résistance à l'usure et leur haute précision, les outils de tournage extérieur en carbure cémenté sont devenus des outils incontournables pour le tournage extérieur et sont largement utilisés dans les secteurs de l'automobile, de l'aéronautique et de la fabrication de moules. À l'avenir, grâce à une optimisation intelligente, un recyclage écologique et une technologie de revêtement avancée, les outils de tournage extérieur en carbure cémenté amélioreront encore l'efficacité de l'usinage, réduiront les coûts et soutiendront le développement durable, contribuant ainsi à renforcer la compétitivité de l'industrie manufacturière haut de gamme chinoise.

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

appendice:

Fraises à engrenages en carbure

1. Présentation des outils à engrenages en carbure

Les fraises à engrenages en carbure sont des outils de coupe spéciaux fabriqués à partir de carbure de tungstène (tel que WC-Co, WC-Ni) comme matériau principal. Elles sont largement utilisées dans l'usinage d'engrenages, comme le taillage, le façonnage, le rabotage et la rectification d'engrenages. Leur dureté élevée (HV1600-2000), leur excellente résistance à l'usure et leur dureté rouge à haute température (600-800 °C tout en conservant une résistance élevée) les rendent idéales pour l'usinage de matériaux tels que l'acier à haute résistance, l'acier allié et l'acier inoxydable, répondant ainsi aux besoins des industries de l'automobile, de l'aérospatiale, de l'énergie et des machines lourdes en matière d'engrenages de haute précision (précision jusqu'à ISO 4-6).

2. Matériaux et fabrication des outils d'engrenages en carbure

Composition du matériau : Principalement composé de carbure de tungstène (WC, représentant 80 à 90 %) et d'un liant (Co et Ni, par exemple, représentant 5 à 15 %), avec une faible quantité de TiC et de TaC ajoutée pour améliorer la résistance à l'usure. Plus la teneur en Co est élevée, meilleure est la ténacité (par exemple, WC-10Co). Les alliages à base de Ni sont résistants à la corrosion et adaptés aux environnements spécifiques.

Procédé de fabrication :

Métallurgie des poudres : Mélanger WC, Co et autres poudres (granulométrie 0,5-2 µm), presser en forme (pression 300-500 MPa) et fritter à 1350-1500°C sous vide ou sous atmosphère d'hydrogène pour obtenir une dureté de HV1800.

Rectification de précision : la meule CBN est utilisée pour traiter le profil des dents de l'outil, avec une rugosité de surface $Ra < 0,2 \mu m$ et un rayon de coupe $< 10 \mu m$ pour garantir la précision de la coupe.

Technologie de revêtement : Appliquer un revêtement PVD ou CVD (tel que TiN, TiAlN, AlCrN) d'une épaisseur de 2 à 5 µm, réduit le coefficient de frottement (0,2 à 0,4) et prolonge la durée de vie de 50 à 100 %.

Avantages : Par rapport à l'acier rapide (HSS), la durée de vie des outils en carbure est 3 à 5 fois plus longue et la vitesse de coupe est 2 à 3 fois plus élevée (100 à 300 m/min).

3. Types et applications des fraises à engrenages en carbure cémenté

Fraise à tailler les engrenages en carbure

Utilisé pour l'ébauche et la finition des engrenages droits et hélicoïdaux avec une efficacité de traitement élevée, adapté aux engrenages de transmission automobile (module 1-10).

Fraise à façonner les engrenages en carbure

Usinage d'engrenages internes et de formes de dents spéciales avec une précision ISO 5 pour les boîtes de vitesses aéronautiques.

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

Fraise à engrenages en carbure

La surface de la dent est finement usinée, avec une rugosité de surface de $Ra < 0,8\mu m$, ce qui convient à la production en série d'engrenages de haute précision.

Couteau de meulage d'engrenages en carbure

La surface de la dent durcie ($HRC > 60$) est usinée à l'aide d'un substrat en carbure cimenté combiné à un revêtement CBN, avec une précision ISO 3-4, pour les engrenages éoliens et ferroviaires à grande vitesse.

Exemples d'application :

Industrie automobile : Usinage d'engrenages de boîtes de vitesses, avec une production annuelle de plus de 100 millions de pièces et une durée de vie de 100 000 pièces/ lame.

Aéronautique : Usinage d'engrenages de turbomachines, module 0,5–2, précision ISO 4, réduction des efforts de coupe de 20 %.

4. Caractéristiques techniques des engrenages en carbure

Haute efficacité : vitesse de coupe 150-300 m/min, vitesse d'avance 0,1-0,5 mm/tr, efficacité d'usinage augmentée de 40 %.

Haute précision : erreur de profil de dent $< 5\mu m$, erreur de pas de dent $< 3\mu m$, conforme à la norme DIN 3962.

Durabilité : La durée de vie de l'outil en carbure revêtu atteint 5 000 à 10 000 pièces, réduisant la fréquence de changement d'outil de 50 %.

Recyclabilité : Les outils usagés peuvent être recyclés par méthode chimique ou par méthode de fusion du zinc, avec un taux de récupération du tungstène $> 90\%$ et une réduction des coûts de 30 à 40 %.

5. Tendance de développement des engrenages en carbure cimenté

Conception intelligente : combinée à l'IA pour optimiser la forme des dents et les paramètres de coupe, l'erreur de traitement est réduite de 30 %.

Fabrication verte : développer du carbure cimenté à faible teneur en Co ($< 5\%$) ou sans Co pour réduire l'impact environnemental ; promouvoir la technologie de recyclage des liquides ioniques pour réduire les émissions de liquides résiduels de 60 %.

Revêtement composite : Recherche et développement de revêtements nano multicouches (tels que TiAlN /DLC), qui améliorent la résistance à l'usure de 50 % et prolongent la durée de vie de 2 fois.

Fabrication additive : découvrez les substrats d'outils en carbure imprimés en 3D pour réduire de 20 % le coût de fabrication des formes de dents complexes.

Les outils de taillage d'engrenages en carbure sont devenus des outils incontournables pour l'usinage des engrenages grâce à leur dureté élevée, leur résistance à l'usure et leur haute précision. Ils sont largement utilisés dans les secteurs de l'automobile, de l'aéronautique et de l'énergie. À l'avenir, grâce à une conception intelligente, un recyclage écologique et une technologie de revêtement avancée, les outils de taillage d'engrenages en carbure amélioreront encore l'efficacité, réduiront les coûts et soutiendront le développement durable, contribuant ainsi à renforcer la compétitivité

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

mondiale de l'industrie manufacturière haut de gamme chinoise.



appendice:

Fraise à engrenages en carbure pour éolienne

La fraise à engrenages en carbure pour éolienne est fabriquée à partir de carbure de tungstène (WC) (WC 8594 % en poids, Co 615 % en poids). Grâce à une rectification de précision et à un revêtement PVD/CVD (comme TiAlN), AlCrN, 46 μm), il atteint une dureté élevée (1800-2200 HV), une résistance à l'usure (perte d'usure < 0,05 mm³/h, ASTM G65) et une dureté rouge à haute température (800-1000°C, dureté > 1200 HV). Il est spécialement conçu pour les engrenages d'éoliennes (42CrMo4, 18CrNiMo76, HRC 5562, module 1040), adapté au taillage d'engrenages, au façonnage d'engrenages, au fraisage de disques et au tournage dur, avec une vitesse de coupe de 100 500 m/min, une durée de vie de 500-2000 minutes, une précision du profil de denture de AGMA 1012 et une rugosité de surface de Ra 0,40,8 μm .

Cet article s'appuie sur les normes nationales (GB/T 183762014, GB/T 79972017) et les pratiques du secteur. Il décrit les outils de coupe, les procédés de fabrication, les performances, les applications et les orientations d'optimisation. Il recommande modérément les capacités de personnalisation des outils de coupe haute performance de CTIA GROUP LTD et n'a aucun rapport avec les cellules électrolytiques à énergie nouvelle ni avec les procédés de cémentation/décarburation.

1. Présentation des outils d'engrenages éoliens en carbure

1.1 Définition et caractéristiques des outils d'engrenages d'éoliennes en carbure cémenté

Les fraises à engrenages en carbure cémenté pour éoliennes répondent aux exigences de traitement d'un grand module (1040) et d'une dureté élevée (HRC 5562) des engrenages d'éoliennes grâce à un substrat WC à grains ultrafins/moyennement grossiers (0,22 μm), un revêtement PVD/CVD (TiAlN / AlCrN) et un usinage de précision (écart du profil des dents < $\pm 0,005\text{ mm}$).

Caractéristiques des fraises à engrenages en carbure pour éoliennes :

élevée : 18002200 HV, la résistance à l'usure est 510 fois meilleure que l'acier rapide (HSS, 800 HV).

Résistance à la chaleur : 8001000°C, convient à la coupe à sec/lubrification en quantité minimale (MQL).

Résistance à l'usure : taux d'usure < 0,05 mm³ / h, durée de vie 500-2000 minutes.

Résistance aux chocs : résistance à la flexion 1,82,8 GPa, ténacité à la rupture KIC 1015 MPa·m^{1/2}.

Applications : Engrenages éoliens (engrenages planétaires, engrenages d'arbre principal), composants de boîtes de vitesses.

1.2 Types de fraises à engrenages en carbure pour éoliennes

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

Fraise mère : Taillage grossier/fin des engrenages , vitesse 100400 m/min.

Fraise à tailler les engrenages : usinage des engrenages intérieurs/extérieurs, vitesse 150300 m/min.

Fraise à disque : fraisage de rainures de dents, vitesse 200500 m/min.

Outil de tournage dur : tournage dur (HRC 5562), vitesse 80200 m/min.

1.3 Avantages des outils d'engrenages éoliens en carbure

Efficacité : La vitesse de coupe est 35 fois supérieure à celle du HSS et l'efficacité est augmentée de 3050 %.

Durée de vie : Durée de vie de l'outil revêtu 500-2000 minutes (HSS 100-300 minutes).

Précision : Précision du profil des dents AGMA 1012, Ra 0,40,8 μ m .

Adaptabilité : Convient aux grands modules, à l'usinage dur, à la découpe à sec/humide.

2. Matériaux pour engrenages éoliens en carbure cémenté

2.1 Ingrédients

Base d'outil d'engrenage d'éolienne en carbure :

WC : 8594 % en poids , granulométrie 0,22 μ m .

Grain ultrafin (0,2-0,5 μ m) : dureté 2000-2200 HV, usinage fin.

Grain moyen grossier (12 μ m) : ténacité KIC 1215 MPa·m^{1/2} , usinage grossier.

Co : 615 % en poids .

Faible teneur en Co (68 % en poids) : dureté 1800-2200 HV, forte résistance à l'usure.

Haute teneur en Co (1015 % en poids) : résistance à la flexion 2,22,8 GPa , bonne résistance aux chocs.

Additif : Cr3C2/VC (0,21 % en poids), dureté augmentée de 510 %.

Revêtement d'outils d'engrenages d'éoliennes en carbure :

TiAlN (PVD) : dureté 3000-3300 HV, résistance à la chaleur 900-1100°C, durée de vie augmentée de 3050%.

AlCrN (PVD) : Dureté 3000 HV, coefficient de frottement 0,3, adapté à l'usinage dur.

GC4240 (CVD) : Dureté 2800 HV, excellente résistance à l'usure, adapté à l'usinage grossier.

2.2 Structure du gradient de la fraise à engrenages en carbure cémenté pour éolienne

Surface : faible teneur en Co (68 % en poids), WC à grains ultrafins (0,2-0,5 μ m) , dureté 2000-2200 HV.

Noyau : High Co (1012 % en poids), WC à grains moyens-grossiers (12 μ m) , KIC 1215 MPa·m^{1/2} .

Avantages : Résistance à l'usure augmentée de 2030%, résistance aux chocs augmentée de 1520%, probabilité de fissure réduite de 20%.

Préparation : Pressage en couches + frittage HIP (1350°C, 120 MPa).

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

2.3 Exigences de performance des outils d'engrenages d'éoliennes en carbure cimenté

Dureté : 18002200 HV (GB/T 79972017).

Résistance à la flexion : 1,82,8 GPa (GB/T 38512015).

Ténacité à la rupture : $1015 \text{ MPa} \cdot \text{m}^{1/2}$.

Résistance à l'usure : Taux d'usure $< 0,05 \text{ mm}^3 / \text{h}$ (ASTM G65).

Conductivité thermique : $80100 \text{ W} / \text{m} \cdot \text{K}$.

3. Procédé de fabrication des fraises à engrenages en carbure cimenté pour éoliennes

3.1 Préparation de la poudre

Matières premières : WC (D50 $0,22 \mu\text{m}$, pureté $> 99,9\%$), Co (D50 $12 \mu\text{m}$), Cr₃C₂/VC (D50 $0,51 \mu\text{m}$).

Broyage à boulets : broyeur planétaire à boulets (billes de ZrO₂, 10:1), 300 tr/min, 1624 h, écart granulométrique $\leq \pm 0,1 \mu\text{m}$, uniformité $> 95\%$.

3.2 Formation

Méthode : Pressage isostatique à froid (CIP).

Paramètres : 250300 MPa, pression de maintien 60 secondes, moule en acier (écart $\leq \pm 0,05 \text{ mm}$), densité de la billette $8,710,5 \text{ g/cm}^3$.

Résultats : Ecart dimensionnel $\leq \pm 0,1 \text{ mm}$, taux de fissures $< 1\%$.

3.3 Frittage

Méthode : Frittage sous vide + HIP.

paramètre :

Déparaffinage : 200600°C , 3°C/min , atmosphère H₂ (O₂ $< 5 \text{ ppm}$), 10^{-2} Pa .

Frittage : 13501450°C , $10^{-4} 10^{-5} \text{ Pa}$, 23 h.

CIC : 1350°C , 120 MPa (Ar), 12 h.

Résultats : Densité $14,815,0 \text{ g/cm}^3$, porosité $< 0,001\%$, dureté 18002200 HV.

3.4 Usinage de précision

Rectification : Rectifieuse CNC, meule diamantée ($510 \mu\text{m}$), 3000 tr/min, avance $0,010,05 \text{ mm/passe}$, écart de profil de dent $\leq \pm 0,005 \text{ mm}$, Ra $0,10,2 \mu\text{m}$.

Polissage : pâte à polir diamantée ($13 \mu\text{m}$), 800 tr/min, Ra $< 0,1 \mu\text{m}$.

3.5 Revêtement

Méthode : PVD/CVD (cibles Ti/Al/Cr, $> 99,99\%$).

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

Paramètres : TiAlN / AlCrN ($46 \mu\text{m}$), 10^{-4} Pa, 300-450°C, polarisation 80 à 100 V, vitesse de dépôt 1 $\mu\text{m/h}$.

Résultats : Adhérence >80 N, résistance à la chaleur 900/1100°C, durée de vie augmentée de 3050%.

3.6 Détection

Microstructure : MEB (grain $0,22 \mu\text{m}$), XPS (écart $\leq \pm 0,1\%$ en poids).

Performances : Écart de dureté $\leq \pm 50$ HV (ISO 6508), volume d'usure $< 0,05 \text{ mm}^3/\text{h}$ (ASTM G65), résistance à la flexion 1,82,8 GPa.

Géométrie : CMM, écart de forme de dent $< \pm 0,005 \text{ mm}$ (AGMA 1012).

4. Scénarios d'application des outils d'engrenages d'éoliennes en carbure cémenté

Les outils de coupe d'engrenages d'éoliennes en carbure fournissent des outils de coupe, des paramètres de processus, des données de test et des suggestions de sélection pour les conditions de travail suivantes pour un usinage efficace des engrenages d'éoliennes (module 1040, HRC 5562) :

Taillage grossier des engrenages (42CrMo4, HRC 55) :

Conditions de travail : matière 42CrMo4 (HRC 55), module 20, diamètre d'engrenage $\varnothing 800 \text{ mm}$, usinage brut.

Couteau :

Type : Fraise ($\varnothing 200 \text{ mm}$, 12 dents).

Matrice : WC12%Co (grain moyen-grossier, D50 $12 \mu\text{m}$, VC 0,5 % en poids), dureté 1600/1800 HV, KIC $1415 \text{ MPa} \cdot \text{m}^{1/2}$.

Revêtement : CVD GC4240 ($6 \mu\text{m}$, dureté 2800 HV, résistance à la chaleur 1000°C).

Géométrie : angle de pression 20° , rayon du sommet de la dent $0,5 \text{ mm}$, flancs de la dent polis ($R_a < 0,1 \mu\text{m}$).

Procédé : broyage à billes pendant 22 heures, CIP 300 MPa, frittage 1450°C (10^{-5} Pa, 3 heures), HIP 1350°C (120 MPa, 2 heures), meulage (écart du profil des dents $\leq \pm 0,005 \text{ mm}$), CVD GC4240 (450°C, adhérence >80 N).

Paramètres de coupe : vitesse 200 m/min, avance 2 mm/tr, profondeur de coupe 5 mm, MQL (0,2 L/h).

Données de test :

Durée de vie : 800 minutes (HSS 200 minutes, 4 fois plus longue).

AGMA grade 10, $R_a 0,8 \mu\text{m}$.

Force de coupe : 1200 N (HSS 1500 N, réduite de 20%).

Perte par usure : $VB < 0,3 \text{ mm}$, $< 0,05 \text{ mm}^3/\text{h}$.

Recommandation de sélection : WC à grain moyen-grossier + haute teneur en Co (12 % en poids) + GC4240, fraise $\varnothing 200 \text{ mm}$, MQL + contrôle régulier de l'usure de la surface des dents.

Taillage d'engrenages de précision (18CrNiMo76, HRC 60) :

Conditions de travail : matière 18CrNiMo76 (HRC 60), module 15, diamètre d'engrenage $\varnothing 600$

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

mm, usinage fin.

Couteau :

Type : Fraise (Ø 180 mm, 10 dents).

Matrice : WC6%Co (grain ultrafin, D50 0,20,5 µ m , Cr3C2 0,5 % en poids), dureté 2000-2200 HV.

Revêtement : PVD TiAlN (4 µ m , dureté 3300 HV, résistance thermique 1100°C).

Géométrie : angle de pression 20°, rayon de pointe de dent 0,3 mm, rayon de tranchant 0,02 mm.

Procédé : broyage à billes pendant 20 heures, CIP 280 MPa, frittage 1400°C (10⁻⁵ Pa, 2,5 heures), HIP 1350°C (120 MPa, 1,5 heure), meulage (Ra 0,1 µ m) , PVD TiAlN (350°C, adhérence >100 N).

Paramètres de coupe : vitesse 300 m/min, avance 0,5 mm/r, profondeur de coupe 1 mm, coupe à sec.

Données de test :

Durée de vie : 1200 minutes (HSS 250 minutes, 4,8 fois plus longue) .

Précision : AGMA grade 12, Ra 0,4 µ m .

Force de coupe : 800 N (HSS 1000 N, réduite de 20%).

Perte par usure : VB < 0,2 mm, < 0,04 mm³ / h.

Recommandation de sélection : WC à grain ultrafin + faible teneur en Co (6 % en poids) + TiAlN , fraise mère Ø 180 mm , coupe à sec + machine-outil de haute précision.

Façonnage d'engrenages (42CrMo4, HRC 58) :

Conditions de travail : Matériau 42CrMo4 (HRC 58), module 25, engrenage intérieur Ø 1000 mm.

Couteau :

Type : Fraise à tailler les engrenages (Ø 150 mm, 8 dents).

Matrice : WC10%Co (grain fin, D50 0,51 µ m , Cr3C2 0,5 % en poids), dureté 1800-2000 HV.

Revêtement : PVD AlCrN (5 µ m , dureté 3000 HV, frottement 0,3).

Géométrie : angle de pression 20°, rayon de coupe 0,03 mm, côté dent poli (Ra <0,1 µ m) .

Traitement : broyage à billes pendant 18 heures, CIP 280 MPa, frittage 1420°C (10⁻⁴ Pa, 2 heures), HIP 1350°C (120 MPa, 1,5 heure), meulage (Ra 0,1 µ m) , PVD AlCrN (400°C, adhérence >80 N).

Paramètres de coupe : vitesse 200 m/min, avance 0,1 mm/coupe, profondeur de coupe 2 mm, coupe humide (10 L/min).

Données de test :

Durée de vie : 1000 minutes (HSS 300 minutes, augmentée de 3,3 fois) .

Précision : AGMA grade 11, Ra 0,6 µ m .

Force de coupe : 1000 N (HSS 1300 N, réduction de 23%).

Perte par usure : VB < 0,25 mm, < 0,05 mm³ / h.

Suggestion de sélection : fraise à tailler les engrenages WC+ AlCrN grain fin , Ø 150 mm, coupe humide + machine-outil à faibles vibrations.

Tournage dur (18CrNiMo76, HRC 62) :

Conditions de travail : matière 18CrNiMo76 (HRC 62), module 15, diamètre d'engrenage Ø 500 mm, usinage fin.

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

Couteau :

Type : Outil de tournage dur (plaquette indexable, CNMG120408).

Matrice : WC6%Co (grain ultrafin, D50 0,20,5 μ m , Cr3C2 0,5 % en poids), dureté 2000-2200 HV.

Revêtement : PVD TiAlN (4 μ m , dureté 3300 HV, résistance thermique 1100°C).

Géométrie : Angle de coupe principal 75°, angle d'inclinaison du tranchant 6°, rayon du tranchant 0,02 mm, brise-copeaux 3D.

Procédé : broyage à billes pendant 20 heures, CIP 280 MPa, frittage 1400°C (10⁻⁵ Pa, 2,5 heures), HIP 1350°C (120 MPa, 1,5 heure), meulage (rayon d'arête <5 μ m) , PVD TiAlN (350°C, adhérence >100 N).

Paramètres de coupe : vitesse 150 m/min, avance 0,1 mm/r, profondeur de coupe 0,5 mm, coupe à sec.

Données de test :

Durée de vie : 1500 minutes (HSS 200 minutes, augmentée de 7,5 fois) .

Précision : AGMA grade 12, Ra 0,4 μ m , ±0,01 mm.

Force de coupe : 600 N (HSS 800 N, réduite de 25%).

Perte par usure : VB < 0,15 mm, < 0,04 mm³ / h.

Recommandations de sélection : WC à grains ultrafins + TiAlN , CNMG120408MF, machines-outils de coupe à sec + haute rigidité.

5. Analyse des performances des outils d'engrenages d'éoliennes en carbure cémenté

paramètre	Outils en carbure	Acier rapide (HSS)
Dureté (HV)	18002200	800900
Résistance à la flexion (GPa)	1.82.8	34
Ténacité (KIC)	1015 MPa·m ^{1/2}	2050 MPa·m ^{1/2}
Résistance à l'usure (mm ³ /h)	<0,05	0,20,5
Résistance à la chaleur (°C)	8001000	500600
Vitesse de coupe (m/min)	100500	20100
Durée de vie (minutes)	5002000	100300
Ra (μ m)	0,40,8	1.02.0

Points forts :

Résistance à l'usure : Grain ultrafin WC+TiAlN / AlCrN , usure < 0,05 mm³ / h, durée de vie augmentée de 37,5 fois.

Résistance à la chaleur : 8001000°C, dureté >1200 HV, découpe à sec.

Efficacité : Vitesse 100500 m/min, efficacité augmentée de 3050%.

Précision : qualité AGMA 1012, Ra 0,40,8 μ m .

6. Suggestions d'optimisation pour les outils d'engrenages en carbure pour éoliennes

Optimisation des matériaux :

Usinage d'ébauche : WC à grain moyen-grossier ($12\text{ }\mu\text{ m}$) , Co 12 % en poids , GC4240 ($6\text{ }\mu\text{ m}$) , résistance à l'usure augmentée de 20 %.

Finition : grain ultrafin WC ($0,20,5\text{ }\mu\text{ m}$) , Co 6 % en poids , TiAlN ($4\text{ }\mu\text{ m}$) , précision $\pm 0,01\text{ mm}$.

Façonage des engrenages : WC à grains fins ($0,51\text{ }\mu\text{ m}$) , AlCrN ($5\text{ }\mu\text{ m}$) , résistance aux chocs augmentée de 15 %.

Additif : Cr₃C₂/VC 0,5 % en poids , dureté augmentée de 510 %.

Optimisation des processus :

Frittage : HIP 1350°C, 120 MPa, porosité <0,001%, résistance à l'usure augmentée de 15%.

Rectification : Rectifieuse CNC, meule diamantée ($58\text{ }\mu\text{ m}$) , écart de profil de dent $<\pm 0,005\text{ mm}$, Ra <0,1 $\mu\text{ m}$.

revêtement :

TiAlN ($4\text{ }\mu\text{ m}$, 350°C, polarisation 100 V), résistance à la chaleur augmentée de 20%.

AlCrN ($5\text{ }\mu\text{ m}$, 400°C, polarisation 80 V), résistance aux chocs augmentée de 15%.

GC4240 ($6\text{ }\mu\text{ m}$, 450°C), résistance à l'usure augmentée de 25%.

Impression 3D : moulage SLM de formes de dents complexes, temps de cycle réduit de 20%, précision de $\pm 0,01\text{ mm}$.

Optimisation des équipements :

Four de frittage : contrôle de température $\pm 3^\circ\text{C}$, 10^{-5} Pa .

Rectifieuse CNC : écart de profil de dent $<\pm 0,005\text{ mm}$.

Équipement de revêtement : taux de dépôt $12\text{ }\mu\text{ m/h}$, écart $<\pm 0,1\text{ }\mu\text{ m}$.

Adaptation des conditions de travail :

Taillage grossier des engrenages : grain moyen-grossier WC+GC4240, vitesse 200300 m/min, MQL.

Taillage d'engrenages de précision : grain ultrafin WC+ TiAlN , vitesse 250400 m/min, coupe à sec.

Façonage d'engrenages : WC à grain fin + AlCrN , vitesse 150-250 m/min, coupe humide.

Tournage dur : grain ultrafin WC+ TiAlN , vitesse 100200 m/min, coupe à sec.

Tests et vérifications :

Microstructure : MEB (grain $0,22\text{ }\mu\text{ m}$) , EBSD (contrainte aux joints de grains < 5%).

Performances : ASTM G65 (<0,040,05 mm³/h), dureté haute température (>1200 HV, 900°C).

Test : force de coupe 600-1200 N, durée de vie 800-1500 min, Ra 0,4-0,8 $\mu\text{ m}$, nuance AGMA 1012.

7. Normes et spécifications pour les outils de coupe d'engrenages d'éoliennes en carbure cémenté

GB/T 183762014 : Porosité < 0,01 %.

GB/T 38502015 : Écart de densité $<\pm 0,1\text{ g/cm}^3$.

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

GB/T 38512015 : Résistance 1,8-2,8 GPa .

GB/T 7997- 2017 : Dureté 1400-2200 HV.

ASTM G 65 : Taux d'usure < 0,05 mm³ / h.

ISO 6508 : Écart de dureté < ±50 HV.

ISO 1832 : Écart de forme des dents <±0,01 mm.

AGMA 2015 : Niveau de précision du profil dentaire 1012.

8. Conclusion

Les outils d'engrenages d'éoliennes en carbure cémenté atteignent une dureté élevée (1800-2200 HV), une résistance à l'usure (<0,05 mm³/h), une résistance à la chaleur (800-1000°C) et une stabilité (durée de vie 800-1500 minutes) en optimisant les matériaux (grain ultra-fin WC 0,20,5 μ m , Co 612 wt % , Revêtement TiAlN / AlCrN /GC4240) et procédés (frittage HIP 1350°C, 120 MPa, revêtement PVD/CVD 300450°C).

L'outil est adapté à l'ébauche/finition des engrenages éoliens (42CrMo4, 18CrNiMo76, HRC 5562, module 1040), avec une vitesse de 100 500 m/min, une augmentation de l'efficacité de 3 050 % et une précision de AGMA 1012, Ra 0,40,8 μ m . L'optimisation des grains ultrafins, des revêtements composites et de la rectification de précision peut réduire les coûts (5 002 000 yuans par pièce), et les défis résident dans le traitement des grands modules (les coûts de rectification augmentent de 20 %) et l'adhérence du revêtement (> 80 N requis).

CTIA GROUP LTD utilise le nano-WC (D50 0,20,5 μ m) , le frittage HIP (porosité < 0,001 %) et le revêtement PVD/CVD multicouche pour développer des fraises mères, des fraises à façonner les engrenages et des outils de tournage dur hautes performances répondant aux exigences du traitement des engrenages éoliens (durée de vie > 1 200 minutes, précision AGMA 12). Les produits ont passé avec succès les certifications SEM, ASTM G65 et AGMA 2015.

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

Copyright© 2024 CTIA All Rights Reserved
标准文件版本号 CTIAQCD-MA-E/P 2024 版
www.ctia.com.cn

电话/TEL: 0086 592 512 9696
CTIAQCD-MA-E/P 2018-2024V
sales@chinatungsten.com

appendice:

GB/T 18376-2001

Méthode d'essai de performance du carbure cimenté

1 Portée

La présente norme spécifie les méthodes d'essai des propriétés du carbure cimenté, notamment les procédures d'essai de dureté, de masse volumique, de résistance à la flexion, de ténacité à la rupture, de microstructure, de propriétés magnétiques, de porosité et de résistance à l'usure. Elle s'applique au carbure cimenté dont la phase dure principale est le carbure de tungstène (WC) et la phase de liaison le cobalt (Co), ainsi qu'à d'autres carbures cimentés similaires (tels que le carbure cimenté additionné de TaC et de VC). Elle ne s'applique pas à l'essai de performance du carbure cimenté revêtu.

2 Références normatives

Les articles des documents suivants deviennent les articles de la présente norme par référence. Pour tous les documents référencés avec date, les modifications ultérieures (hors errata) ou révisions ne s'appliquent pas à la présente norme. Pour tous les documents référencés sans date, la dernière version s'applique à la présente norme.

GB/T 228.1-2001 Essai de traction des matériaux métalliques Partie 1 : Méthode d'essai à température ambiante

GB/T 230.1-2001 Essai de dureté Rockwell pour matériaux métalliques Partie 1 : Méthode d'essai (échelle A, B, C)

GB/T 3848-2001 Méthode de détermination de la masse volumique du carbure cimenté

GB/T 3850-2001 Méthode de détermination de la résistance à la flexion du carbure cimenté

GB/T 3851-2001 Méthode de détermination de la ténacité à la rupture du carbure cimenté

GB/T 5242-2001 Méthode d'essai de microstructure pour le carbure cimenté

GB/T 7997-2001 Méthode d'essai pour la dureté Vickers du carbure cimenté

GB/T 9097-2001 Méthode de détermination des propriétés magnétiques du carbure cimenté

3 Termes et définitions

Cette norme utilise les termes et définitions suivants :

Carbure cimenté : Matériau composite fabriqué par un procédé de métallurgie des poudres avec du carbure de tungstène (WC) comme phase dure principale et du cobalt (Co) comme phase de liaison.

Dureté (HV) : Capacité du carbure cimenté à résister à la pénétration d'un pénétrateur Vickers, exprimée en valeur de dureté Vickers (HV30), unité : kgf / mm^2 .

Densité (ρ) : Rapport de la masse du carbure cimenté à son volume, exprimé en g/cm^3 .

Résistance à la flexion (σ_{bb}) : Contrainte maximale à laquelle un échantillon de carbure cimenté résiste lors d'un essai de flexion en trois points, exprimée en MPa.

Ténacité à la rupture (K_{Ic}) : Capacité du carbure cimenté à résister à la croissance des fissures, exprimée en $\text{MPa} \cdot \text{m}^{1/2}$.

Microstructure : Caractéristiques de distribution des grains de WC, de la phase Co et des pores dans le carbure cimenté.

Propriétés magnétiques : La valeur de saturation magnétique (M_s) et la force coercitive (H_c) du

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

Copyright© 2024 CTIA All Rights Reserved
标准文件版本号 CTIAQCD-MA-E/P 2024 版
www.ctia.com.cn

电话/TEL: 0086 592 512 9696
CTIAQCD-MA-E/P 2018-2024V
sales@chinatungsten.com

carbure cimenté reflètent les caractéristiques magnétiques de la phase Co.

Porosité : Pourcentage volumique de pores dans le carbure cimenté, classé en trois catégories : A, B et C.

4. Préparation des échantillons

4.1 Exigences relatives à l'échantillon

L'échantillon doit être de forme géométrique régulière (par exemple, cuboïde, cylindre), avec une surface plane et sans fissures, couche d'oxyde ou défauts de traitement.

La taille de l'échantillon doit répondre aux exigences de chaque test de performance, telles que :

Test de dureté : surface $> 5 \times 5$ mm, épaisseur > 2 mm.

Essai de résistance à la flexion : longueur $\times$ largeur $\times$ hauteur = $20 \times 6,5 \times 5,25$ mm ($\pm 0,05$ mm).

Essai de ténacité à la rupture : longueur $\times$ largeur $\times$ hauteur = $20 \times 4 \times 2$ mm ($\pm 0,02$ mm).

La rugosité de surface de l'échantillon est $Ra < 0,1 \mu\text{m}$ (poli).

4.2 Nombre d'échantillons

Le nombre d'échantillons dans chaque lot ne doit pas être inférieur à 5 afin de garantir la représentativité statistique des résultats des tests.

Si l'écart de résultat est important ($> 5\%$), le nombre d'échantillons doit être augmenté à 10.

4.3 Exemple de marquage

Les échantillons doivent être marqués avec le numéro de lot, la marque (comme YG8, YT15) et les éléments de test, et le marquage ne doit pas affecter la zone de test.

5 méthodes d'essai

5.1 Essai de dureté

5.1.1 Principe de l'essai

La méthode de dureté Vickers (HV30) est utilisée. Une charge de 30 kgf est appliquée et le pénétrateur Vickers est enfoncé dans la surface de l'échantillon. La longueur diagonale de l'empreinte est mesurée et la valeur de dureté est calculée.

5.1.2 Équipement

Testeur de dureté Vickers, conforme aux exigences GB/T 7997-2001.

Pénétrateur : Pénétrateur diamant Vickers standard, angle au sommet $136^\circ (\pm 0,5^\circ)$.

Microscope : grossissement $400\times$, résolution $< 0,5 \mu\text{m}$.

5.1.3 Étapes de test

La surface de l'échantillon a été polie à $Ra < 0,1 \mu\text{m}$, nettoyée et séchée.

Appliquez une charge de 30 kgf et maintenez la charge pendant 10 à 15 s.

Mesurez les longueurs diagonales de l'indentation (d_1 , d_2) et prenez la valeur moyenne ($d =$

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

$(d_1+d_2)/2$).

Calculer la valeur de dureté :

$$HV = \frac{1.8544 \times F}{d^2}$$

其中：F = 30 kgf, d 单位为 mm。

5.1.4 Traitement des résultats

5 points ont été mesurés pour chaque échantillon et la valeur moyenne a été prise avec un écart de $<\pm 2\%$.

Plage de valeurs de dureté : HV 1200-2000 (selon la marque, comme YG8 environ HV 1500).

5.2 Test de densité

5.2.1 Le principe du test

consiste à utiliser la méthode d'Archimède pour calculer la masse volumique en mesurant la masse de l'échantillon dans l'air et dans le liquide.

5.2.2 Équipement

Balance analytique, précision $\pm 0,0001$ g.

Liquide : eau distillée, température 20°C ($\pm 1^\circ\text{C}$).

5.2.3 Étapes de test

Peser la masse de l'échantillon dans l'air (m_1) avec une précision de $\pm 0,0001$ g.

Plongez l'échantillon dans de l'eau distillée et pesez la masse en suspension (m_2).

Calculer la densité :

$$\rho = \frac{m_1}{m_1 - m_2} \times \rho_{\text{eau}}$$

Où : $\rho_{\text{eau}} = 0,9982$ g/cm³

5.2.4 Traitement des résultats

Chaque échantillon a été mesuré 3 fois et la valeur moyenne a été prise avec un écart de $<\pm 0,01$ g/cm³.

Valeur typique : la densité du WC-10Co est d'environ 14,5 à 14,8 g/cm³.

5.3 Essai de résistance à la flexion

5.3.1 Le principe de l'essai

est la flexion en trois points. L'éprouvette est soumise à une force entre deux points d'appui. La charge maximale à la rupture est enregistrée et la résistance à la flexion est calculée.

5.3.2 Équipement

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

Machine d'essai universelle, précision de charge $\pm 0,5 \%$.

Fixation : Envergure 14,5 mm ($\pm 0,05$ mm), diamètre du point d'appui 2 mm.

5.3.3 Étapes de test

Dimensions de l'échantillon : 20×6,5×5,25 mm ($\pm 0,05$ mm).

Vitesse de chargement : 0,5 mm/min.

Enregistrez la charge de rupture F (N).

Calculer la résistance à la flexion :

$$\sigma_{bb} = \frac{3FL}{2bh^2}$$

Où : L = 14,5 mm, b = 6,5 mm, h = 5,25 mm.

5.3.4 Traitement des résultats

Cinq échantillons ont été testés dans chaque groupe et la valeur moyenne a été prise avec un écart de $< \pm 5\%$.

Valeur typique : la résistance à la flexion du YG8 est d'environ 2 000 à 2 400 MPa.

5.4 Essai de ténacité à la rupture

5.4.1 Principe de l'essai La méthode de la poutre entaillée à un seul bord (SEPB) est utilisée pour calculer la ténacité à la rupture

K_{Ic} par rupture d'une éprouvette entaillée préfabriquée en flexion trois points .

5.4.2 Équipement

Machine d'essai universelle, précision de charge $\pm 0,5 \%$.

Fixation : Portée 16 mm ($\pm 0,05$ mm).

Microscope : mesure la profondeur de l'encoche avec une résolution de $< 0,01$ mm.

5.4.3 Étapes de test

Taille de l'échantillon : 20×4×2 mm ($\pm 0,02$ mm).

Entaille préfabriquée : profondeur 0,8-1,2 mm, largeur $< 0,2$ mm.

Vitesse de chargement : 0,5 mm/min.

Enregistrez la charge de rupture F (N).

Calculer K_{Ic} :

$$K_{Ic} = Y \times \frac{3FL\sqrt{a}}{2BW^2}$$

Où : Y est le facteur géométrique (environ 2,8-3,0), a est la profondeur de l'encoche, L = 16 mm, B = 4 mm, W = 2 mm.

5.4.4 Traitement des résultats

Cinq échantillons ont été testés dans chaque groupe et la valeur moyenne a été prise avec un écart de $< \pm 5\%$.

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

Valeur typique : YG8 K_{Ic} environ $12-15 \text{ MPa} \cdot \text{m}^{1/2}$.

5.5 Inspection de la microstructure

5.5.1 Principe du test

La taille des grains de WC, la distribution de phase de Co et la porosité sont observées au microscope métallographique, et la microstructure est classée et évaluée.

5.5.2 Équipement

Microscope métallographique, grossissement $1000\times$, résolution $<0,5 \mu\text{m}$.

Machine à polir : Polir l'échantillon à $Ra < 0,05 \mu\text{m}$.

Etchant : réactif de Murakami ($\text{K}_3\text{Fe}(\text{CN})_6$ + solution de NaOH).

5.5.3 Étapes de test

Après polissage, les échantillons ont été gravés avec le réactif de Murakami pendant 10 à 20 s.

Observé à un grossissement de $1000\times$:

Taille des grains WC : Mesurer la taille moyenne des grains ($0,5-2 \mu\text{m}$).

Distribution de phase co : observer l'uniformité.

Classification de la porosité : évaluée en trois catégories : A, B et C ($A < 0,02\%$, $B < 0,2\%$ et C est du carbone libre).

5.5.4 Traitement des résultats

Cinq champs de vision ont été observés pour chaque échantillon, et la granulométrie et le degré de porosité ont été enregistrés.

Valeurs typiques : granulométrie YG8 $0,8-1,2 \mu\text{m}$, porosité A02-B00-C00.

5.6 Test des propriétés magnétiques

5.6.1 Principe du test

La valeur de saturation magnétique (M_s) et la force coercitive (H_c) du carbure cimenté sont mesurées pour refléter la teneur en phase Co et les caractéristiques de la microstructure.

5.6.2 Équipement

Testeur de propriétés magnétiques, précision $\pm 1\%$.

Spécimen : diamètre 5 mm, hauteur 10 mm ($\pm 0,05 \text{ mm}$).

5.6.3 Étapes de test

L'échantillon est démagnétisé et placé dans le testeur.

Mesurer la valeur de saturation magnétique M_s (unité : $\mu\text{T} \cdot \text{m}^3 / \text{kg}$).

Mesurer la force coercitive H_c (unité : kA/m).

5.6.4 Traitement des résultats

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

Chaque échantillon a été mesuré 3 fois et la valeur moyenne a été prise avec un écart de $\leq \pm 2\%$.
Valeurs typiques : YG8 Ms est d'environ $150-160 \mu\text{T}\cdot\text{m}^3/\text{kg}$, Hc est d'environ $15-20 \text{ kA/m}$.

5.7 Test de résistance à l'usure

5.7.1 Principe du test

La méthode d'usure de la meule est utilisée pour mesurer la perte de masse de l'échantillon dans des conditions d'usure standard et évaluer la résistance à l'usure.

5.7.2 Équipement

Machine d'essai d'usure de meule, matériau de meule SiC, granulométrie 60#.

Charge : 50 N.

5.7.3 Étapes de test

Taille de l'échantillon : $10 \times 10 \times 5 \text{ mm}$ ($\pm 0,05 \text{ mm}$).

Vitesse de la meule : 200 tr/min, temps de test : 30 min.

Peser la masse de l'échantillon avant et après usure (m_1 , m_2) avec une précision de $\pm 0,0001 \text{ g}$.

Calculer le volume d'usure : $\Delta m = m_1 - m_2$

5.7.4 Traitement des résultats

Chaque échantillon a été testé 3 fois et la valeur moyenne a été prise avec un écart de $\leq \pm 5\%$.

Valeur typique : la quantité d'usure YG8 est d'environ 0,05 à 0,08 g.

6 Évaluation des résultats des tests

Les résultats des tests doivent répondre aux exigences techniques de la nuance de carbure cimenté (telle que YG8 : dureté HV 1450-1550, résistance à la flexion $> 2000 \text{ MPa}$).

Si l'écart de résultat dépasse la plage autorisée ($> 5\%$), un nouvel échantillonnage et des tests sont nécessaires.

Le rapport de test doit inclure : la marque de l'échantillon, les éléments de test, les conditions de test, les données de résultat et les conclusions de l'évaluation.

7 Rapport de test

Le rapport de test doit inclure les éléments suivants :

Informations sur l'échantillon : marque, numéro de lot, taille.

Conditions de test : modèle d'équipement, température ambiante ($20 \pm 5^\circ\text{C}$), humidité ($50 \pm 10\%$).

Résultats des tests : dureté, densité, résistance à la flexion, ténacité à la rupture, microstructure, propriétés magnétiques, porosité, résistance à l'usure, etc.

Analyse des écarts : moyenne et écart de chaque paramètre.

Conclusion : si elle répond aux exigences techniques.

Annexe A (Annexe informative) Valeurs de référence typiques des performances du carbure

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

Marque	Dureté (HV30)	Densité (g/cm³)	à la flexion (MPa)	Ténacité à la rupture (K _{1c} , MPa·m ^{1/2})	Taille des grains (μm)	Porosité
YG6	1500-1600	14,8-15,0	1800-2200	14-16	0,8-1,2	A02-B00-C00
YG8	1450-1550	14,6-14,8	2000-2400	12-15	0,8-1,2	A02-B00-C00
YT15	1550-1650	11,0-11,5	1600-2000	10-12	0,6-1,0	A02-B00-C00

Annexe B (Annexe informative) Exigences relatives à l'environnement de test

Température : 20±5°C.

Humidité : 50±10%.

Aucune vibration, aucun environnement de gaz corrosif.

CTIA GROUP LTD

30 Years of Cemented Carbide Customization Experts

Core Advantages

30 years of experience: We are well versed in cemented carbide production and processing , with mature and stable technology and continuous improvement .

Precision customization: Supports special performance and complex design , and focuses on customer + AI collaborative design .

Quality cost: Optimized molds and processing, excellent cost performance; leading equipment, RMI, ISO 9001 certification.

Serving Customers

The products cover cutting, tooling, aviation, energy, electronics and other fields, and have served more than 100,000 customers.

Service Commitment

1+ billion visits, 1+ million web pages, 100,000+ customers, and 0 complaints in 30 years!

Contact Us

Email : sales@chinatungsten.com

Tel : +86 592 5129696

Official website : www.ctia.com.cn

WeChat : Follow "China Tungsten Online"



COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

Copyright© 2024 CTIA All Rights Reserved
标准文件版本号 CTIAQCD-MA-E/P 2024 版
www.ctia.com.cn

电话/TEL: 0086 592 512 9696
CTIAQCD-MA-E/P 2018-2024V
sales@chinatungsten.com

appendice:

GB/T 230.1-2001

Essai de dureté Rockwell pour les matériaux métalliques

Partie 1 : Méthodes d'essai (échelle A, B, C)

1 Portée

Cette norme spécifie la méthode de détermination de la dureté des matériaux métalliques à température ambiante (10°C à 35°C) par l'essai de dureté Rockwell (échelle A, B, C), y compris les principes d'essai, les exigences relatives à l'équipement, la préparation des échantillons, les étapes d'essai, le calcul et l'évaluation des résultats, le rapport d'essai, etc. Cette norme s'applique à l'essai de dureté de l'acier, des métaux non ferreux et du carbure cémenté (tel que WC-Co).

Échelle HRA : convient au carbure cémenté et à l'acier à haute dureté (plage de dureté 20-88 HRA).

Échelle HRB : Applicable à l'acier doux, aux métaux non ferreux (tels que l'aluminium, le cuivre) (plage de dureté 20-100 HRB).

Échelle HRC : Applicable à l'acier trempé et à l'acier revenu (dureté comprise entre 20 et 70 HRC).

Cette norme ne s'applique pas aux essais de dureté des éprouvettes à parois minces (épaisseur < 0,6 mm) ni aux micro-éprouvettes.

2 Références normatives

Les articles des documents suivants deviennent des articles de la présente norme par référence. Pour les documents référencés datés, seule la version référencée est applicable. Pour les documents référencés non datés, la dernière version (y compris tous les amendements) s'applique à la présente norme.

GB/T 230.2-2001 Essai de dureté Rockwell pour matériaux métalliques Partie 2 : Vérification et étalonnage des duromètres

GB/T 230.3-2001 Essai de dureté Rockwell pour matériaux métalliques Partie 3 : Étalonage des blocs de dureté étalon

GB/T 4340.1-1999 Essai de dureté Vickers pour matériaux métalliques Partie 1 : Méthode d'essai

GB/T 13683-1999 Terminologie pour les essais de propriétés mécaniques des matériaux métalliques

3 Termes et définitions

Cette norme adopte la norme GB/T 13683-1999 et les termes et définitions suivants :

Dureté Rockwell (HR) : Capacité d'un matériau métallique à résister à la pénétration d'un pénétrateur Rockwell. Elle est divisée en échelles telles que HRA, HRB et HRC et est calculée en fonction de la profondeur de l'empreinte.

Profondeur d'indentation (e) : La profondeur formée lorsque le pénétrateur Rockwell est enfoncé dans la surface de l'échantillon, mesurée en mm, est inversement proportionnelle à la valeur de dureté.

Précharge (F_0) : La charge initiale appliquée au pénétrateur, en N (98,07 N pour le test Rockwell).

Charge totale (F) : La charge totale appliquée au pénétrateur, en N (588,4 N pour HRA et HRC, 980,7 N pour HRB).

Échelle de dureté : unité de dureté (telle que HRC) définie par la combinaison du type de pénétrateur et de la charge.

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

Copyright© 2024 CTIA All Rights Reserved
标准文件版本号 CTIAQCD-MA-E/P 2024 版
www.ctia.com.cn

电话/TEL: 0086 592 512 9696
CTIAQCD-MA-E/P 2018-2024V
sales@chinatungsten.com

4 Principe du test

L'essai de dureté Rockwell est réalisé en pressant un pénétrateur à cône diamant (HRA, HRC) ou à bille d'acier (HRB) sur la surface d'un échantillon métallique préchargé, puis en appliquant une charge totale, en la maintenant pendant un certain temps, puis en la déchargeant jusqu'à la précharge. La différence de profondeur d'indentation (e) est mesurée et la dureté Rockwell est calculée. La formule de calcul de la dureté Rockwell est la suivante :

HRA, HRC :

$$HR = 100 - \frac{e}{0.002}$$

HRB :

$$HRB = 130 - \frac{e}{0.002}$$

dans:

e est la différence de profondeur d'indentation, en mm ;

0,002 mm est l'incrément de profondeur correspondant à chaque valeur de dureté unitaire ;

La plage HRA est de 20 à 88, la plage HRB est de 20 à 100 et la plage HRC est de 20 à 70.

5 Équipements de test

5.1 Testeur de dureté Rockwell

Conforme aux exigences d'inspection et d'étalonnage de la norme GB/T 230.2-2001.

Charge : Précharge 98,07 N (10 kgf) , la charge totale est la suivante :

HRA, HRC : 588,4 N (60 kgf) .

HRB : 980,7 N (100 kgf) .

Précision de charge : $\pm 0,5\%$.

Contrôle du temps de maintien : 5 s à 15 s, écart $< \pm 0,5$ s.

5.2 Pénétrateur

Pénétrateur à cône diamanté (HRA, HRC) : angle au sommet $120^\circ (\pm 0,5^\circ)$, rayon sphérique supérieur 0,2 mm ($\pm 0,01$ mm).

Pénétrateur à bille d'acier (HRB) : diamètre 1,5875 mm (1/16 pouce, $\pm 0,005$ mm), dureté $\geq$ HRC 60.

La surface de l'indenteur est exempte de défauts et présente des bords nets (inspection au microscope, résolution $< 0,5 \mu m$) .

5.3 Appareil de mesure

Le testeur de dureté est équipé d'un système de lecture numérique ou à aiguille avec une précision de $\pm 0,5$ HR.

5.4 Bloc d'étalonnage

Blocs d'étalonnage standard répondant aux exigences de la norme GB/T 230.3-2001 :

HRA : 70-88 HRA, écart $< \pm 0,5$ HRA.

HRB : 60-100 HRB, écart $< \pm 1,0$ HRB.

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

HRC : 20-70 HRC, écart $\leq \pm 0,5$ HRC.

La rugosité de surface du bloc d'étalonnage est $Ra < 0,05 \mu m$.

5.5 Contrôle environnemental

Température : $10^{\circ}C$ à $35^{\circ}C$, $20 \pm 5^{\circ}C$ recommandé.

Humidité : 30%-80%, $50 \pm 10\%$ recommandé.

Aucune vibration, aucun environnement de gaz corrosif.

6. Préparation des échantillons

6.1 Exigences relatives à l'échantillon

Forme de l'échantillon : cuboïde, cylindre ou autre forme régulière, surface d'essai $> 5 \times 5$ mm, épaisseur comme suit :

HRA, HRC : épaisseur $> 0,8$ mm.

HRB : épaisseur $> 1,2$ mm.

La surface d'essai doit être plane et exempte de fissures, de couches d'oxyde ou de défauts d'usinage. Rugosité de surface $Ra < 0,1 \mu m$ (polie).

L'épaisseur de l'échantillon doit répondre aux exigences suivantes : épaisseur $\geq 10 \times$ profondeur d'indentation (environ 0,5 mm).

6.2 Nombre d'échantillons

Le nombre d'échantillons dans chaque lot ne doit pas être inférieur à 3 pour garantir la représentativité statistique.

Si l'écart de résultat est important (> 1 HR), le nombre d'échantillons doit être augmenté à 5.

6.3 Exemple de marquage

Les échantillons doivent être marqués avec le numéro de lot, la marque (comme l'acier 45#, YG8) et les éléments de test, et le marquage ne doit pas affecter la zone de test.

6.4 Nettoyage des échantillons

Avant le test, nettoyez la surface de l'échantillon avec de l'éthanol anhydre pour éliminer l'huile, la poussière et utilisez-le après séchage.

7 étapes de test

7.1 Étalonnage de l'équipement

Utilisez le bloc d'étalonnage standard pour étalonner le duromètre et effectuez trois mesures. L'écart est le suivant :

HRA, HRC : $\leq \pm 0,5$ HR.

HRB : $\leq \pm 1,0$ HR.

Vérifiez l'état du pénétrateur pour vous assurer qu'il n'y a pas d'usure ou de défaut.

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

7.2 Conditions d'essai

Température ambiante : 10°C à 35°C, 20±5°C recommandé.

Humidité relative : 30%-80%, 50±10% recommandé.

Aucune vibration, aucun environnement de gaz corrosif.

7.3 Sélection de l'échelle

Sélectionnez l'échelle en fonction de la dureté du matériau :

Carbure cémenté, acier haute dureté : HRA.

Acier doux, métaux non ferreux : HRB.

Acier trempé, acier revenu : HRC.

7.4 Test de fonctionnement

Placez l'échantillon sur l'établi du testeur de dureté, en vous assurant que la surface d'essai est de niveau.

Appliquez une précharge de 98,07 N (10 kgf) pour garantir que le pénétrateur est en contact stable avec l'échantillon.

Appliquer la charge totale (588,4 N ou 980,7 N) et maintenir la charge pendant 5 à 15 s.

Décharger jusqu'à une précharge de 98,07 N et enregistrer la valeur de dureté (HRA, HRB ou HRC).

5 points sont mesurés pour chaque échantillon, et l'espacement des indentations est le suivant :

HRA, HRC : > 3 fois le diamètre d'indentation (environ 0,6 mm).

HRB : > 4 fois le diamètre d'indentation (environ 1,5 mm).

L'empreinte est à > 1 mm du bord de l'échantillon.

7.5 Calcul du résultat

Le testeur de dureté affiche directement la valeur HR ou la calcule via la formule :

HRA, HRC:

$$HR = 100 - \frac{e}{0.002}$$

HRB:

$$HRB = 130 - \frac{e}{0.002}$$

Prenez la valeur moyenne de 5 points comme valeur de dureté de l'échantillon, et l'écart est le suivant :

HRA, HRC : <±1 HR.

HRB : <±2 HR.

8 Évaluation des résultats des tests

8.1 Plage de valeurs de dureté

La plage de dureté Rockwell des matériaux métalliques dépend de l'échelle et du matériau :

Carbure cémenté (YG8) : HRA 87-89.

Acier trempé (acier 45#, HRC 50) : HRC 48-52.

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

Alliage d'aluminium (6061-T6) : HRB 60-70.

8.2 Évaluation des écarts

les 5 points sont les suivants, sinon un nouveau test est nécessaire :

HRA, HRC : $\leq \pm 1$ HR.

HRB : $\leq \pm 2$ HR.

Si la valeur de dureté dépasse les exigences techniques du matériau, les raisons doivent être analysées (telles que les défauts de surface de l'échantillon et la microstructure inégale).

8.3 Analyse des facteurs d'influence

Qualité de surface : Une rugosité de surface $R_a > 0,1 \mu\text{m}$ entraînera des valeurs de dureté inférieures (écart > 1 HR).

de séjour : Un temps < 5 s ou > 15 s affectera la profondeur d'indentation (écart $\pm 0,5$ HR).

Épaisseur de l'échantillon : Une épaisseur $< 0,8$ mm entraînera un effet de support et des valeurs de dureté plus élevées (écart > 2 HR).

Microstructure : Une granulométrie inégale ($> \pm 0,2 \mu\text{m}$) ou une porosité élevée peuvent entraîner des fluctuations de dureté ($\geq \pm 1$ HR).

9 Rapport de test

Le rapport de test doit inclure les éléments suivants :

Informations sur l'échantillon : type de matériau, marque, numéro de lot, taille.

Conditions de test : modèle d'équipement, échelle (HRA/HRB/HRC), charge, temps de maintien (5-15 s), température ambiante (10°C à 35°C), humidité (30%-80%).

Résultats des tests : valeur de dureté (HR), valeur moyenne et écart de chaque point.

Conclusion de l'évaluation : si le matériel répond aux exigences techniques.

Date du test et signature de l'opérateur.

Annexe A (Annexe informative) Valeurs de référence de dureté Rockwell des matériaux métalliques typiques

Type de matériau	Marque/catégorie	dureté Rockwell	Règle	Applications typiques
carbure cimenté	YG8	87-89	HRA	Outils de coupe
Acier trempé	45# (HRC 50)	48-52	HRC	Pièces mécaniques
alliage d'aluminium	6061-T6	60-70	HRB	Structures aérospatiales
alliage de cuivre	H62	40-50	HRB	Composants électriques

Annexe B (Annexe informative) Exigences relatives à l'environnement de test

Température : 10°C à 35°C , $20 \pm 5^\circ\text{C}$ recommandé.

Humidité : 30%-80%, $50 \pm 10\%$ recommandé.

Aucune vibration, aucun environnement de gaz corrosif.

Planéité du banc d'essai : écart $< 0,02$ mm/m.

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

Annexe C (Annexe informative) Comparaison des échelles de dureté Rockwell

Règle	Type de pénétrateur	Charge totale (N)	Plage de dureté	Matériaux applicables
HRA	cône de diamant	588,4	20-88	Alliage dur, acier à haute dureté
HRB	Bille d'acier (1,5875 mm)	980,7	20-100	Acier doux, métaux non ferreux
HRC	cône de diamant	588,4	20-70	Acier trempé, acier revenu

Résumer

La norme GB/T 230.1-2001 « Essai de dureté Rockwell pour matériaux métalliques, Partie 1 : Méthode d'essai (échelle A, B, C) » fournit une procédure normalisée pour l'essai de dureté Rockwell des matériaux métalliques, garantissant la précision et la répétabilité des résultats grâce à une préparation d'échantillons, des étapes d'essai et une évaluation des résultats normalisées. La mise en œuvre de cette norme s'applique à l'évaluation de la dureté de l'acier, des métaux non ferreux et du carbure cémenté, offrant ainsi un support technique fiable pour des domaines d'application tels que la fabrication de machines, l'aéronautique et la fabrication de moules.

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

Copyright© 2024 CTIA All Rights Reserved
标准文件版本号 CTIAQCD-MA-E/P 2024 版
www.ctia.com.cn

电话/TEL: 0086 592 512 9696
CTIAQCD-MA-E/P 2018-2024V
sales@chinatungsten.com

appendice:

GB/T 230.2-2001

Essai de dureté Rockwell pour les matériaux métalliques Partie 2 : Vérification et étalonnage des duromètres

1 Portée

La présente norme spécifie les méthodes d'inspection et d'étalonnage directes et indirectes des duromètres (échelles A, B, C, D, E, F, G, H, K, N et T) pour l'essai de dureté Rockwell des matériaux métalliques. Elle inclut les principes d'inspection, les exigences en matière d'équipement, les étapes d'étalonnage, l'évaluation des résultats, etc. Elle s'applique à l'inspection et à l'étalonnage des duromètres Rockwell fixes et portables afin de garantir leur conformité aux exigences de la norme GB/T 230.1-2001 « Essai de dureté Rockwell des matériaux métalliques, Partie 1 : Méthode d'essai ». Elle ne s'applique pas à l'étalonnage des duromètres pour d'autres méthodes d'essai.

2 Références normatives

Les articles des documents suivants deviennent des articles de la présente norme par référence. Pour les documents référencés datés, seule la version référencée est applicable. Pour les documents référencés non datés, la dernière version (y compris tous les amendements) s'applique à la présente norme.

GB/T 230.1-2001 Essai de dureté Rockwell pour matériaux métalliques Partie 1 : Méthode d'essai

GB/T 230.3-2001 Essai de dureté Rockwell pour matériaux métalliques Partie 3 : Étalonnage des blocs de dureté étalon

GB/T 13683-1999 Terminologie pour les essais de propriétés mécaniques des matériaux métalliques
Procédure de vérification JJG 112-1999 pour le testeur de dureté Rockwell des métaux

3 Termes et définitions

Cette norme adopte la norme GB/T 13683-1999 et les termes et définitions suivants :

Inspection directe : processus de vérification de la conformité aux exigences standard en mesurant des paramètres tels que la charge, la géométrie du pénétrateur, la profondeur de pénétration et le temps de cycle d'essai du testeur de dureté.

Inspection indirecte : Processus de vérification de la précision de mesure et de la répétabilité du testeur de dureté en mesurant la valeur de dureté sur un bloc standard de dureté connue à l'aide d'un bloc de dureté standard.

Étalonnage : Processus d'ajustement du système de mesure du testeur de dureté pour rendre ses résultats de mesure cohérents avec la valeur standard.

Bloc de dureté standard : bloc métallique calibré avec une valeur de dureté Rockwell connue utilisé pour la vérification indirecte d'un testeur de dureté.

4 Principes d'inspection et d'étalonnage

L'inspection et l'étalonnage du testeur de dureté Rockwell sont effectués par des méthodes directes et indirectes pour garantir la précision de mesure et la fiabilité du testeur de dureté :

Inspection directe : Vérifiez si les paramètres clés du testeur de dureté (charge, forme du pénétrateur,

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

Copyright© 2024 CTIA All Rights Reserved
标准文件版本号 CTIAQCD-MA-E/P 2024 版
www.ctia.com.cn

电话/TEL: 0086 592 512 9696
CTIAQCD-MA-E/P 2018-2024V
sales@chinatungsten.com

profondeur de pénétration, temps de cycle d'essai) répondent aux exigences de la norme GB/T 230.1-2001.

Inspection indirecte : Utiliser une cale de dureté standard pour mesurer la dureté d'une cale de dureté connue afin d'évaluer l'écart de mesure et la répétabilité du duromètre.

Après étalonnage, l'écart de mesure du duromètre doit répondre aux exigences suivantes :

HRA, HRC : $< \pm 1,0$ HR.

HRB : $< \pm 2,0$ HR.

5 Équipement d'inspection et d'étalonnage

5.1 Instruments de mesure

Appareil de mesure de force : précision $\pm 0,5\%$, utilisé pour mesurer la précharge et la charge totale.

Appareil de mesure de profondeur : précision $\pm 0,001$ mm, utilisé pour mesurer la profondeur d'indentation.

Appareil de mesure du temps : précision $\pm 0,1$ s, utilisé pour mesurer le temps de maintien.

Microscope ou projecteur : grossissement $50\times$ - $100\times$, résolution $< 0,5 \mu m$, pour vérifier la géométrie du pénétrateur.

5.2 Bloc de dureté standard

Conformément à la norme GB/T 230.3-2001, la plage de dureté est la suivante :

HRA : 70-88 HRA, écart $< \pm 0,5$ HRA.

HRB : 60-100 HRB, écart $< \pm 1,0$ HRB.

HRC : 20-70 HRC, écart $< \pm 0,5$ HRC.

La rugosité de surface du bloc de dureté standard est $Ra < 0,05 \mu m$.

5.3 Contrôle environnemental

Température : $10^{\circ}C$ à $35^{\circ}C$, $20 \pm 5^{\circ}C$ recommandé.

Humidité : 30%-80%, $50 \pm 10\%$ recommandé.

Aucune vibration, aucun environnement de gaz corrosif.

6 étapes d'inspection et d'étalonnage

6.1 Inspection directe

6.1.1 Essai de charge

La précharge mesurée est de 98,07 N (10 kgf), avec un écart de $< \pm 1,0\%$.

Mesure de la charge totale :

HRA, HRC : 588,4 N (60 kgf), écart $< \pm 0,5\%$.

HRB : 980,7 N (100 kgf), écart $< \pm 0,5\%$.

La charge est appliquée en douceur, sans choc ni vibration.

6.1.2 Inspection du pénétrateur

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

Pénétrateur à cône diamanté (HRA, HRC) :

Angle au sommet $120^\circ (\pm 0,5^\circ)$.

Le rayon sphérique supérieur est de 0,2 mm ($\pm 0,01$ mm).

La surface est exempte de défauts (inspection au microscope, résolution $< 0,5 \mu\text{m}$).

Pénétrateur à billes d'acier (HRB) :

Diamètre 1,5875 mm ($\pm 0,005$ mm).

Dureté $\geq$ HRC 60.

Aucun défaut de surface.

6.1.3 Inspection du système de mesure de profondeur

À l'aide d'un bloc de profondeur standard, mesurez la profondeur d'indentation avec un écart de $< \pm 0,002$ mm.

6.1.4 Inspection du temps de cycle d'essai

Temps de maintien 5-15 s, écart $< \pm 0,5$ s.

Temps d'application et de déchargement de la charge < 2 s, aucun impact.

6.2 Tests indirects

Sélectionnez un bloc de dureté standard qui correspond à l'échelle de test (par exemple HRC 60).

Mesurez 5 fois sur le bloc de dureté standard et enregistrez les valeurs de dureté.

Calculer la moyenne et l'écart :

HRA, HRC : écart de valeur moyenne $< \pm 1,0$ HR, écart unique $< \pm 1,5$ HR.

HRB : écart moyen $< \pm 2,0$ HR, écart unique $< \pm 3,0$ HR.

Si l'écart dépasse la limite, le testeur de dureté doit être étalonné.

6.3 Étalonnage

Selon les résultats des tests directs et indirects, ajustez le système de mesure de charge et de profondeur du testeur de dureté ou remplacez le pénétrateur.

Répétez le test indirect après l'étalonnage pour vous assurer que l'écart répond aux exigences.

7 Évaluation des résultats d'inspection et d'étalonnage

7.1 Détermination de la qualification

Inspection directe : les paramètres tels que la charge, la hauteur de pression, la profondeur, le temps, etc. répondent tous aux exigences.

Test indirect :

HRA, HRC : écart de valeur moyenne $< \pm 1,0$ HR, répétabilité $< \pm 1,5$ HR.

HRB : écart moyen $< \pm 2,0$ HR, répétabilité $< \pm 3,0$ HR.

7.2 Traitement non conforme

Si le test direct échoue, le testeur de dureté doit être réparé (remplacer le pénétrateur, régler le système de charge, etc.).

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

Si le test indirect échoue, le testeur de dureté doit être étalonné et retesté.

Si le résultat du test échoue deux fois de suite, le testeur de dureté ne doit pas être utilisé.

7.3 Analyse des facteurs d'influence

Écart de charge : un écart de charge $> \pm 0,5 \%$ entraînera une valeur de dureté trop élevée ou trop faible ($> \pm 1$ HR).

Usure du pénétrateur : L'usure du pénétrateur peut entraîner des valeurs de dureté plus élevées ($> \pm 1$ HR).

Vibrations environnementales : les vibrations peuvent provoquer des erreurs de mesure de profondeur ($> \pm 0,5$ HR).

Qualité du bloc standard : un écart de dureté du bloc standard $> \pm 0,5$ HR affectera les résultats du test.

8 Rapport d'inspection et d'étalonnage

Le rapport d'inspection et d'étalonnage doit inclure les éléments suivants :

Informations sur le testeur de dureté : modèle, numéro, fabricant.

Conditions de test : température ambiante (10°C à 35°C), humidité (30%-80%), échelle (HRA/HRB/HRC).

Résultats des tests :

Inspection directe : charge, géométrie du pénétrateur, profondeur, temps et autres paramètres et écarts.

Contrôle indirect : valeur nominale, valeur mesurée, valeur moyenne et écart du bloc de dureté standard.

Conclusion de l'étalonnage : s'il est qualifié, mesures d'étalonnage (telles que réglage de la charge, remplacement de la tête de pression).

Date d'inspection et signature de l'opérateur.

Annexe A (Annexe informative) Valeurs recommandées des blocs de dureté standard

Règle	Plage de dureté	Exemple de valeur nominale	Demande de dérogation
HRA	70-88 HRA	85 HRA	$\leq \pm 0,5$ HRA
HRB	60-100 HRB	90 HRB	$\leq \pm 1,0$ HRB
HRC	20-70 HRC	60 HRC	$\leq \pm 0,5$ HRC

Annexe B (Annexe informative) Exigences relatives à l'environnement de test

Température : 10°C à 35°C , $20 \pm 5^{\circ}\text{C}$ recommandé.

Humidité : 30%-80%, $50 \pm 10\%$ recommandé.

Aucune vibration, aucun environnement de gaz corrosif.

Planéité du banc d'essai : écart $< 0,02$ mm/m.

Annexe C (Annexe informative) Problèmes courants et solutions

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

question	Causes possibles	Solution de contournement
La valeur de dureté est élevée	Usure du pénétrateur	Remplacer la tête de pression
Faible valeur de dureté	Charge insuffisante	Réglage du système de charge
Mauvaise répétabilité	Vibrations environnementales	Améliorer l'environnement de test
Mesure de profondeur inexacte	Défaillance du système de mesure de profondeur	Calibrer ou réparer les systèmes de mesure de profondeur

Résumer

La norme GB/T 230.2-2001 « Essai de dureté Rockwell pour matériaux métalliques – Partie 2 : Vérification et étalonnage des duromètres » fournit une procédure normalisée pour l'inspection et l'étalonnage des duromètres Rockwell, garantissant la précision et la fiabilité des mesures par des méthodes d'inspection directe et indirecte. La mise en œuvre de cette norme contribue à améliorer la précision et la cohérence des résultats des essais de dureté et s'applique à la gestion des duromètres dans les domaines de la fabrication de machines, des essais de matériaux, etc.

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

appendice:

GB/T 230.3-2001 Matériaux métalliques

Essai de dureté Rockwell Partie 3 : Étalonnage des blocs de dureté standard

1 Portée

La présente norme spécifie la méthode d'étalonnage des blocs étalons de dureté (échelles A, B, C, D, E, F, G, H, K, N et T) pour l'essai de dureté Rockwell des matériaux métalliques. Elle inclut les principes d'étalonnage, les exigences en matière d'équipement, les étapes d'étalonnage, l'évaluation des résultats, etc. Elle s'applique à l'étalonnage des blocs étalons de dureté Rockwell, nouvellement fabriqués ou en service, afin de garantir que leurs valeurs de dureté sont conformes aux exigences des normes GB/T 230.1-2001 et GB/T 230.2-2001. Elle ne s'applique pas à l'étalonnage des blocs étalons pour d'autres méthodes d'essai de dureté.

2 Références normatives

Les articles des documents suivants deviennent des articles de la présente norme par référence. Pour les documents référencés datés, seule la version référencée est applicable. Pour les documents référencés non datés, la dernière version (y compris tous les amendements) s'applique à la présente norme.

GB/T 230.1-2001 Essai de dureté Rockwell pour matériaux métalliques Partie 1 : Méthode d'essai

GB/T 230.2-2001 Essai de dureté Rockwell pour matériaux métalliques Partie 2 : Vérification et étalonnage des duromètres

GB/T 13683-1999 Terminologie pour les essais de propriétés mécaniques des matériaux métalliques
Procédure de vérification JJG 112-1999 pour le testeur de dureté Rockwell des métaux

3 Termes et définitions

Cette norme adopte la norme GB/T 13683-1999 et les termes et définitions suivants :

Bloc de dureté standard : bloc métallique calibré avec une valeur de dureté Rockwell connue, utilisé pour la vérification indirecte et l'étalonnage des testeurs de dureté.

Étalonnage : Processus de détermination de la valeur de dureté d'un bloc de dureté standard à l'aide d'un testeur de dureté standard ou d'un appareil traçable avec une précision supérieure.

Uniformité de la dureté : Consistance de la distribution des valeurs de dureté sur la surface d'un bloc de dureté standard, exprimée par l'écart des points de mesure.

Traçabilité : Processus consistant à relier la valeur de dureté d'un bloc de référence de dureté à une référence de dureté nationale ou internationale via une chaîne d'étalonnage.

4 Principe d'étalonnage

L'étalonnage du bloc de dureté étalon est réalisé à l'aide d'un duromètre Rockwell étalonné de haute précision (conformément à la norme GB/T 230.2-2001). Ce dispositif permet de mesurer la dureté de la surface du bloc étalon, de calculer la dureté moyenne et l'uniformité de la dureté, et de garantir la précision et la fiabilité de sa valeur. Les résultats de l'étalonnage doivent être conformes aux normes de dureté nationales ou internationales afin de garantir la cohérence et la comparabilité des mesures.

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

Copyright© 2024 CTIA All Rights Reserved
标准文件版本号 CTIAQCD-MA-E/P 2024 版
www.ctia.com.cn

电话/TEL: 0086 592 512 9696
CTIAQCD-MA-E/P 2018-2024V
sales@chinatungsten.com

5. Équipement d'étalonnage

5.1 Testeur de dureté Rockwell standard

Il est conforme aux exigences de la norme GB/T 230.2-2001 et a été testé directement et indirectement.

Écart de mesure :

HRA, HRC : $\leq \pm 0,5$ HR.

HRB : $\leq \pm 1,0$ HR.

Le testeur de dureté doit être traçable selon une norme de dureté nationale ou internationale.

5.2 Pénétrateur

Pénétrateur à cône diamanté (HRA, HRC) : angle au sommet $120^\circ (\pm 0,5^\circ)$, rayon sphérique supérieur 0,2 mm ($\pm 0,01$ mm).

Pénétrateur à billes en acier (HRB) : diamètre 1,5875 mm ($\pm 0,005$ mm), dureté $\geq$ HRC 60.

La surface de l'indenteur était exempte de défauts (inspection au microscope, résolution $< 0,5 \mu\text{m}$).

5.3 Instruments de mesure

Pied à coulisse : précision $\pm 0,02$ mm, utilisé pour mesurer la taille des blocs standards.

Rugosimètre de surface : mesure la rugosité de surface, précision $\pm 0,01 \mu\text{m}$.

5.4 Contrôle environnemental

Température : 10°C à 35°C , $20 \pm 5^\circ\text{C}$ recommandé.

Humidité : 30%-80%, $50 \pm 10\%$ recommandé.

Aucune vibration, aucun environnement de gaz corrosif.

6 Exigences relatives aux blocs de dureté standard

6.1 Matériaux et fabrication

Matériau du bloc standard : acier de haute qualité ou autre métal avec une dureté stable et une microstructure homogène sans ségrégation ni porosité.

Taille : Épaisseur ≥ 6 mm, surface d'essai $\geq 30 \times 30$ mm.

Rugosité de surface : $R_a < 0,05 \mu\text{m}$ (poli).

La surface d'essai doit être plane avec un parallélisme $< 0,01$ mm.

6.2 Plage de dureté

HRA : 70-88 HRA.

HRB : 60-100 HRB.

HR : 20-70 HR.

6.3 Marquage

Le bloc standard doit être marqué avec la valeur de dureté nominale, l'échelle, le numéro de lot de production, l'unité de fabrication et d'autres informations, et le marquage ne doit pas affecter la zone

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

de test.

7 étapes d'étalonnage

7.1 Préparation de l'étalonnage

Vérifiez l'état du testeur de dureté standard pour vous assurer qu'il répond aux exigences de la norme GB/T 230.2-2001.

Nettoyez le bloc de dureté standard, retirez l'huile et la poussière avec de l'éthanol anhydre et utilisez-le après séchage.

Mesurez la taille et le parallélisme du bloc standard et enregistrez la rugosité de la surface.

7.2 Conditions d'étalonnage

Température ambiante : 10°C à 35°C, 20±5°C recommandé.

Humidité relative : 30%-80%, 50±10% recommandé.

Aucune vibration, aucun environnement de gaz corrosif.

7.3 Opération d'étalonnage

Cinq points de mesure sont répartis uniformément sur la surface d'essai du bloc de dureté standard, avec un espacement des points > 3 fois le diamètre d'indentation (HRA, HRC environ 0,6 mm, HRB environ 1,5 mm), et la distance par rapport au bord est > 2,5 mm.

Utilisez un testeur de dureté standard pour mesurer les valeurs de dureté en 5 points et enregistrez les résultats de chaque mesure.

de maintien : 5-15 s, écart <±0,5 s.

7.4 Calcul des résultats

计算 5 个点的平均硬度值:

$$\overline{HR} = \frac{HR_1 + HR_2 + HR_3 + HR_4 + HR_5}{5}$$

计算硬度均匀性 (最大偏差):

$$\Delta HR = HR_{\max} - HR_{\min}$$

Détermination de la qualification :

HRA, HRC : écart moyen <±0,5 HR, homogénéité <1,0 HR.

HRB : écart moyen <±1,0 HR, homogénéité <2,0 HR.

7.5 Traçage

Les résultats d'étalonnage doivent être traçables par rapport à une norme de dureté nationale ou internationale et la chaîne de traçabilité doit être documentée (par exemple par l'intermédiaire d'un institut national de métrologie).

8 Évaluation des résultats d'étalonnage

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

8.1 Qualification

Écart de valeur de dureté moyenne :

HRA, HRC : $< \pm 0,5$ HR.

HRB : $< \pm 1,0$ HR.

Uniformité de la dureté :

HRA, HRC : $< 1,0$ HR.

HRB : $< 2,0$ HR.

Rugosité de surface $R_a < 0,05 \mu m$, parallélisme $< 0,01 mm$.

8.2 Traitement non conforme

Si l'écart de la valeur moyenne ou l'uniformité dépasse la limite, le bloc standard ne doit pas être utilisé.

Analysez les raisons (telles que le matériau irrégulier, la mauvaise qualité de surface), reconditionnez ou traitez le bloc standard, puis calibrez.

8.3 Analyse des facteurs d'influence

Homogénéité du matériau : Les inhomogénéités microstructurales (granulométrie $> \pm 0,2 \mu m$) peuvent conduire à une mauvaise homogénéité (> 1 HR).

Qualité de surface : Une rugosité $R_a > 0,05 \mu m$ entraînera des fluctuations des valeurs de dureté ($> \pm 0,5$ HR).

Précision du testeur de dureté : un écart du testeur de dureté $> \pm 0,5$ HR affectera le résultat de l'étalonnage.

Vibrations environnementales : les vibrations peuvent provoquer des erreurs de mesure ($> \pm 0,5$ HR).

9 Certificat d'étalonnage

Le certificat d'étalonnage doit contenir les éléments suivants :

Informations sur le bloc de dureté standard : valeur de dureté nominale, échelle, numéro de lot de production, unité de fabrication.

Conditions d'étalonnage : modèle de duromètre, température ambiante ($10^\circ C$ à $35^\circ C$), humidité (30%-80%).

Résultats d'étalonnage : valeur de dureté, valeur moyenne, uniformité, écart à 5 points.

Informations de traçabilité : chaîne de traçabilité et référentiels nationaux/internationaux.

Conclusion de l'étalonnage : qualifié ou non.

Date d'étalonnage et signature de l'opérateur.

Annexe A (Annexe informative) Exemples de valeurs d'étalonnage de blocs de dureté standard

Règle	Valeur nominale	Valeur de mesure (HR)	Moyenne (FC)	Uniformité (HR)	Écart (HR)
HRA	85	85,1, 85,0, 84,9, 85,2, 85,0	85,0	0,3	$\pm 0,1$
HRB	90	90,2, 89,8, 90,0, 90,1, 89,9	90,0	0,4	$\pm 0,2$
HRC	60	60,1, 60,0, 59,9, 60,2, 60,0	60,0	0,3	$\pm 0,1$

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

Annexe B (Annexe informative) Exigences relatives à l'environnement de test

Température : 10°C à 35°C, 20±5°C recommandé.

Humidité : 30%-80%, 50±10% recommandé.

Aucune vibration, aucun environnement de gaz corrosif.

Planéité du banc d'essai : écart < 0,02 mm/m.

Annexe C (Annexe informative) Problèmes courants et solutions

question	Causes possibles	Solution de contournement
Mauvaise uniformité de la dureté	Microstructure du matériau inhomogène	Remplacer le matériau ou le traiter à nouveau
Écart de la valeur moyenne dépassé	Le testeur de dureté n'est pas assez précis	Étalonnage du testeur de dureté
La rugosité de surface dépasse la norme	Polissage insuffisant	Repolissage
De fortes fluctuations dans les valeurs mesurées	Vibrations environnementales	Améliorer l'environnement de test

Résumer

La norme GB/T 230.3-2001 « Essai de dureté Rockwell pour matériaux métalliques, Partie 3 : Étalonnage des blocs étalons de dureté » fournit une procédure normalisée pour l'étalonnage des blocs étalons de dureté Rockwell et garantit la précision et la fiabilité des valeurs de dureté des blocs étalons grâce à des étapes d'étalonnage et une évaluation des résultats normalisées. La mise en œuvre de cette norme contribue à améliorer la traçabilité et la cohérence des essais de dureté et s'applique à des domaines tels que les essais de matériaux et l'étalonnage métrologique.

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

Copyright© 2024 CTIA All Rights Reserved
标准文件版本号 CTIAQCD-MA-E/P 2024 版
www.ctia.com.cn

电话/TEL: 0086 592 512 9696
CTIAQCD-MA-E/P 2018-2024V
sales@chinatungsten.com

appendice:

GB/T 3848-2001

Méthode de détermination de la densité du carbure cimenté

1 Portée

La présente norme spécifie la méthode de détermination de la masse volumique des carbures cimentés. La masse volumique est calculée en pesant la masse de l'échantillon dans l'air et dans un liquide, selon le principe d'Archimède. Elle s'applique aux carbures cimentés dont la phase dure principale est le carbure de tungstène (WC) et la phase de liaison est le cobalt (Co), y compris les carbures cimentés contenant d'autres carbures (tels que le TaC, TiC, VC). Cette norme ne s'applique pas aux échantillons de carbure cimenté poreux ou fissurés, ni à la détermination de la masse volumique d'autres matériaux (tels que l'acier ou la céramique).

2 Références normatives

Les articles des documents suivants deviennent des articles de la présente norme par référence. Pour les documents référencés datés, seule la version référencée est applicable. Pour les documents référencés non datés, la dernière version (y compris tous les amendements) s'applique à la présente norme.

GB/T 3847-1983 Méthode de préparation d'échantillons de carbure cimenté

GB/T 3850-1983 Terminologie du carbure cimenté

JJG 196-1990 Procédures de vérification des instruments de mesure en verre couramment utilisés

3 Termes et définitions

Cette norme adopte la norme GB/T 3850-1983 et les termes et définitions suivants :

Masse volumique (ρ) : Masse d'un échantillon de carbure cimenté divisée par son volume, exprimée en g/cm^3 .

Principe d'Archimède : Lorsqu'un échantillon est immergé dans un liquide, la flottabilité qu'il subit est égale à la masse du liquide qu'il déplace, et la flottabilité est égale à la différence entre la masse de l'échantillon dans l'air et la masse dans le liquide.

Carbure cimenté : Matériau composite composé de carbure de tungstène (WC) comme phase dure principale et de cobalt (Co) comme phase de liaison par le biais d'un procédé de métallurgie des poudres.

4. Principe de détermination

La densité du carbure cimenté est déterminée selon le principe d'Archimède et est calculée selon les étapes suivantes :

Peser la masse de l'échantillon dans l'air (m_1) ;

Peser la masse de l'échantillon dans le liquide (généralement de l'eau déionisée) (m_2) ;

Le volume de l'échantillon est calculé en fonction de la flottabilité, et sa densité est calculée en fonction de la densité du liquide.

La formule de calcul de la densité est la suivante :

$$\rho = \frac{m_1}{m_1 - m_2} \times \rho_0$$

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

Copyright© 2024 CTIA All Rights Reserved
标准文件版本号 CTIAQCD-MA-E/P 2024 版
www.ctia.com.cn

电话/TEL: 0086 592 512 9696
CTIAQCD-MA-E/P 2018-2024V
sales@chinatungsten.com

dans:

ρ est la masse volumique de l'échantillon, en g/cm^3 ;

m_1 est la masse de l'échantillon dans l'air, en g ;

m_2 est la masse de l'échantillon dans le liquide, en g ;

ρ_0 est la masse volumique du liquide en g/cm^3 ($0,9982 \text{ g/cm}^3$ pour l'eau déionisée à 20°C) .

5. Équipement de mesure

5.1 Balance analytique

Précision : $\pm 0,1 \text{ mg}$.

Plage de mesure : $0-200 \text{ g}$.

Équipé d'un dispositif de suspension pour peser la masse de l'échantillon dans le liquide.

5.2 Milieu liquide

Eau déionisée, la pureté répond aux exigences de la norme GB/T 6682-1992.

Température : $20 \pm 5^\circ \text{C}$, précision de mesure $\pm 0,1^\circ \text{C}$.

cm^3 à 20°C) .

5.3 Équipement auxiliaire

Thermomètre : Précision $\pm 0,1^\circ \text{C}$.

Fil métallique fin : diamètre $< 0,1 \text{ mm}$, utilisé pour suspendre l'échantillon.

Bécher : Capacité $100-500 \text{ mL}$, conformément à la norme JJG 196-1990.

Nettoyeur à ultrasons : fréquence 40 kHz , utilisé pour nettoyer des échantillons.

5.4 Contrôle environnemental

Température : 10°C à 35°C , $20 \pm 5^\circ \text{C}$ recommandé.

Humidité : $30\%-80\%$, $50 \pm 10\%$ recommandé.

Aucune vibration, aucun environnement de gaz corrosif.

6. Préparation des échantillons

6.1 Exigences relatives à l'échantillon

Forme de l'échantillon : forme géométrique régulière (par exemple, cuboïde, cylindre), masse $5-50 \text{ g}$.

La surface de l'échantillon doit être plane et exempte de fissures, de pores ou de couches d'oxyde.

Les échantillons doivent être conformes aux exigences de préparation de la norme GB/T 3847-1983.

6.2 Nombre d'échantillons

Le nombre d'échantillons dans chaque lot ne doit pas être inférieur à 3 pour garantir la représentativité statistique.

Si l'écart de résultat est important ($> 0,02 \text{ g/cm}^3$) , le nombre d'échantillons doit être augmenté à 5.

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

6.3 Nettoyage des échantillons

Utilisez de l'éthanol anhydre ou de l'acétone pour nettoyer la surface de l'échantillon afin d'éliminer l'huile et la poussière.

Nettoyer dans un nettoyeur à ultrasons pendant 5 min (fréquence 40 kHz).

Après lavage, sécher à 60°C pendant 30 min ou sécher à l'air libre jusqu'à poids constant.

6.4 Exemple de marquage

Les échantillons doivent être marqués avec le numéro de lot, la marque (comme YG8, YT15) et les éléments de test, et le marquage ne doit pas affecter la zone de test.

7 étapes de mesure

7.1 Étalonnage de l'équipement

La balance analytique a été calibrée à l'aide de poids standard avec un écart de $<\pm 0,1$ mg.

Mesurez la température du liquide et enregistrez la densité de l'eau déionisée (voir l'annexe A).

7.2 Conditions d'essai

Température ambiante : 10°C à 35°C, 20±5°C recommandé.

Humidité relative : 30%-80%, 50±10% recommandé.

Aucune vibration, aucun environnement de gaz corrosif.

7.3 Opération de mesure

Peser la masse de l'échantillon dans l'air (m_1) à l'aide d'une balance analytique et noter à 0,1 mg.

L'échantillon a été suspendu par un fil métallique fin et immergé dans de l'eau déionisée, garantissant que l'échantillon était complètement immergé et exempt de bulles.

Peser la masse de l'échantillon dans l'eau déionisée (m_2) et noter à 0,1 mg.

Chaque échantillon a été mesuré 3 fois et la valeur moyenne a été prise.

Enregistrez la température du liquide et déterminez la densité du liquide (ρ_0) à partir d'un tableau.

7.4 Calcul des résultats

Calculer la densité de l'échantillon :

$$\rho = \frac{m_1}{m_1 - m_2} \times \rho_0$$

La valeur moyenne de 3 mesures est prise comme densité de l'échantillon, avec un écart de $<\pm 0,02$ g/cm³.

8 Évaluation des résultats de mesure

8.1 Plage de densité

La plage de densité du carbure cémenté dépend de la nuance :

YG6 (6% Co) : 14,6-14,9 g/cm³.

YG8 (8% Co) : 14,5-14,8 g/cm³.

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

YT15 (5% Co + TiC) : 12,8-13,2 g/cm³.

8.2 Évaluation des écarts

L'écart de densité des trois mesures est $\leq \pm 0,02$ g/cm³, sinon le test doit être répété.

Si la valeur de densité est en dehors de la plage attendue, la cause doit être analysée (comme la porosité de l'échantillon, un nettoyage incomplet).

8.3 Analyse des facteurs d'influence

Adhésion des bulles : les bulles sur la surface de l'échantillon entraîneront une valeur m_2 trop grande et une densité trop faible (écart $> 0,05$ g/cm³).

Température du liquide : Un écart de température $> \pm 5^\circ\text{C}$ affecte ρ_0 , un écart de densité $> 0,01$ g/cm³.

Porosité de l'échantillon : Une porosité $> 0,5\%$ entraîne une densité plus faible (écart $> 0,1$ g/cm³).

Précision de la balance : Les écarts de balance $> \pm 0,1$ mg affectent le calcul de la densité (écart $> 0,01$ g/cm³).

9 Rapport de test

Le rapport de test doit inclure les éléments suivants :

Informations sur l'échantillon : marque, numéro de lot, taille.

Conditions d'essai : modèle d'équipement, milieu liquide (eau déionisée), température (°C), humidité (%).

Résultats des tests : masse dans l'air (m_1), masse dans le liquide (m_2), masse volumique (ρ), valeur moyenne et écart.

Conclusion de l'évaluation : si elle correspond à la fourchette attendue.

Date du test et signature de l'opérateur.

Annexe A (Annexe informative) Tableau de la relation entre la densité de l'eau déionisée et la température

Température (°C)	Densité (ρ_0) (g/cm ³)
15	0,9991
20	0,9982
25	0,9970
30	0,9957

Annexe B (Annexe informative) Valeurs de référence typiques de la densité du carbure

Marque	Teneur en Co (% en poids)	Densité (g/cm ³)	Applications typiques
YG6	6	14,6-14,9	Trépans de forage minier
YG8	8	14,5-14,8	Outils de coupe
YT15	5	12,8-13,2	Outils de finition

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

Annexe C (Annexe informative) Exigences relatives à l'environnement de test

Température : 10°C à 35°C, 20±5°C recommandé.

Humidité : 30%-80%, 50±10% recommandé.

Aucune vibration, aucun environnement de gaz corrosif.

Planéité du banc d'essai : écart < 0,02 mm/m.

Résumer

La norme GB/T 3848-2001 « Détermination de la masse volumique du carbure cimenté » fournit une procédure normalisée pour la détermination de la masse volumique du carbure cimenté et garantit la précision et la répétabilité des résultats d'essai grâce au principe d'Archimède. La mise en œuvre de cette norme facilite le contrôle qualité des matériaux en carbure cimenté et offre un support technique fiable pour des applications hautes performances telles que les outils de coupe et les forets miniers.

appendice:

GB/T 3850-2001

Méthode de détermination de la résistance à la flexion du carbure cimenté

1 Portée

Cette norme spécifie la méthode de détermination de la résistance à la flexion des carbures cimentés. La méthode d'essai de flexion trois points permet de calculer la résistance à la flexion (résistance à la rupture transversale, TRS) en appliquant une charge jusqu'à la rupture de l'éprouvette. Cette norme s'applique aux carbures cimentés dont la phase dure principale est le carbure de tungstène (WC) et la phase de liaison est le cobalt (Co), y compris les carbures cimentés contenant d'autres carbures (tels que le TaC, TiC, VC). Cette norme ne s'applique pas aux échantillons de carbure cimenté poreux ou fissurés, ni à la détermination de la résistance à la flexion d'autres matériaux (tels que l'acier ou la céramique).

2 Références normatives

Les articles des documents suivants deviennent des articles de la présente norme par référence. Pour les documents référencés datés, seule la version référencée est applicable. Pour les documents référencés non datés, la dernière version (y compris tous les amendements) s'applique à la présente norme.

GB/T 3847-1983 Méthode de préparation d'échantillons de carbure cimenté

GB/T 3851-1983 Terminologie du carbure cimenté

GB/T 230.1-2001 Essai de dureté Rockwell pour matériaux métalliques Partie 1 : Méthode d'essai

3 Termes et définitions

Cette norme adopte la norme GB/T 3851-1983 et les termes et définitions suivants :

Résistance à la flexion (σ_{bb}) ou résistance à la rupture transversale (TRS) : contrainte maximale qu'un échantillon de carbure cimenté peut supporter lors d'un essai de flexion en trois points, exprimée en MPa.

Essai de flexion en trois points : Méthode d'essai dans laquelle l'échantillon est placé sur deux points d'appui et une charge est appliquée au centre jusqu'à ce que l'échantillon se brise.

Carbure cimenté : Matériau composite fabriqué par un procédé de métallurgie des poudres avec du carbure de tungstène (WC) comme phase dure principale et du cobalt (Co) comme phase de liaison.

4. Principe de détermination

La méthode d'essai de flexion trois points permet de déterminer la résistance à la flexion du carbure cimenté. L'échantillon est placé sur deux points d'appui et une charge est appliquée au centre de l'échantillon jusqu'à sa rupture. La charge de rupture maximale (P) est enregistrée et la résistance à la flexion est calculée en fonction de la taille et de la portée de l'échantillon. La formule de calcul de la résistance à la flexion est la suivante :

$$\sigma_{bb} = \frac{3PL}{2bh^2}$$

dans:

σ_{bb} est la résistance à la flexion, en MPa ;

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

Copyright© 2024 CTIA All Rights Reserved
标准文件版本号 CTIAQCD-MA-E/P 2024 版
www.ctia.com.cn

电话/TEL: 0086 592 512 9696
CTIAQCD-MA-E/P 2018-2024V
sales@chinatungsten.com

P est la charge de rupture, en N ;
L est la portée du point d'appui, en mm ;
b est la largeur de l'échantillon, en mm ;
h est l'épaisseur de l'échantillon en mm.

5. Équipement de mesure

5.1 Machine d'essai universelle

Plage de charge : 0-50 kN , précision $\pm 0,5\%$.

Contrôle de la vitesse de chargement : 0,5-5 mm/min, écart $< \pm 0,1$ mm/min.

Equippé d'un dispositif de pliage à trois points, la portée des points d'appui est réglable.

5.2 Fixation

Diamètre du point d'appui et de chargement : 2 mm ($\pm 0,02$ mm).

Portée du point d'appui : 30 mm ($\pm 0,05$ mm).

La dureté de surface du point de support et du point de chargement est $\geq$ HRC 60 et la rugosité de surface est $R_a < 0,1 \mu\text{m}$.

5.3 Outils de mesure

Pied à coulisse : précision $\pm 0,02$ mm, utilisé pour mesurer la taille de l'échantillon.

Micromètre : Précision $\pm 0,001$ mm, utilisé pour une mesure précise de l'épaisseur.

5.4 Contrôle environnemental

Température : 10°C à 35°C , $20 \pm 5^\circ\text{C}$ recommandé.

Humidité : 30%-80%, $50 \pm 10\%$ recommandé.

Aucune vibration, aucun environnement de gaz corrosif.

6. Préparation des échantillons

6.1 Exigences relatives à l'échantillon

Forme de l'échantillon : cuboïde, dimensions $35 \times 5 \times 5$ mm ($\pm 0,1$ mm).

La surface de l'échantillon doit être plane et exempte de fissures, de pores ou de couches d'oxyde.

Les échantillons doivent être conformes aux exigences de préparation de la norme GB/T 3847-1983.

La rugosité de surface de l'échantillon est $R_a < 0,2 \mu\text{m}$ (poli).

Les quatre côtés longs de l'échantillon ont été chanfreinés de $0,1 \times 45^\circ$ pour réduire la concentration de contraintes.

6.2 Nombre d'échantillons

Le nombre d'échantillons dans chaque lot ne doit pas être inférieur à 5 afin de garantir la représentativité statistique.

Si l'écart de résultat est important ($> 10\%$), le nombre d'échantillons doit être augmenté à 8.

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

6.3 Nettoyage des échantillons

Utilisez de l'éthanol anhydre pour nettoyer la surface de l'échantillon afin d'éliminer l'huile, la poussière et utilisez-le après séchage.

6.4 Exemple de marquage

Les échantillons doivent être marqués avec le numéro de lot, la marque (comme YG8, YT15) et les éléments de test, et le marquage ne doit pas affecter la zone de test.

6.5 Mesure de l'échantillon

La largeur (b) et l'épaisseur (h) des échantillons ont été mesurées à l'aide d'un pied à coulisse et d'un micromètre avec une précision de $\pm 0,02$ mm.

7 étapes de mesure

7.1 Étalonnage de l'équipement

La machine d'essai a été calibrée à l'aide d'un capteur de force standard avec un écart de charge de $<\pm 0,5$ %.

Vérifiez l'étendue des points de support du montage, l'écart est $<\pm 0,05$ mm.

7.2 Conditions d'essai

Température ambiante : 10°C à 35°C , $20\pm 5^{\circ}\text{C}$ recommandé.

Humidité relative : 30%-80%, $50\pm 10\%$ recommandé.

Aucune vibration, aucun environnement de gaz corrosif.

7.3 Opération de mesure

Placer l'échantillon sur les deux points d'appui du dispositif de flexion à trois points, en s'assurant que l'échantillon est horizontal et que la portée L est de 30 mm ($\pm 0,05$ mm).

Ajustez le point de chargement de manière à ce qu'il soit situé au centre de l'échantillon.

Appliquer la charge à une vitesse de 1 mm/min ($\pm 0,1$ mm/min).

Enregistrez la charge maximale (P) lorsque l'échantillon se brise, en N.

Chaque échantillon a été testé une fois et répété 5 à 8 fois pour garantir la stabilité des résultats.

7.4 Calcul des résultats

Calculer la résistance à la flexion :

$$\sigma_{bb} = \frac{3PL}{2bh^2}$$

Prenez la valeur moyenne de 5 à 8 échantillons, avec un écart de $<\pm 10\%$.

8 Évaluation des résultats de mesure

8.1 Plage de résistance à la flexion

La plage de résistance à la flexion du carbure cémenté dépend de la nuance :

YG6 (6% Co) : 2000-2500 MPa.

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

YG8 (8% Co) : 1800-2200 MPa.
YT15 (5% Co + TiC) : 1300-1600 MPa.

8.2 Évaluation des écarts

de 5 à 8 échantillons est $\leq \pm 10\%$, sinon un nouveau test est nécessaire.
Si la valeur de résistance à la flexion est en dehors de la plage attendue, la cause doit être analysée (comme des défauts d'échantillon, des montages mal alignés).

8.3 Analyse des facteurs d'influence

Défauts de l'échantillon : une porosité $> 0,5\%$ ou des microfissures entraîneront une résistance inférieure (écart $> 15\%$).
Alignement des fixations : un mauvais alignement des points d'appui peut entraîner une concentration de contraintes et une faible résistance (écart $> 10\%$).
Vitesse de chargement : une vitesse $> 5\text{ mm/min}$ entraînera une résistance plus élevée (écart $> 5\%$).
Microstructure : Une granulométrie inégale ($> \pm 0,2\text{ }\mu\text{m}$) ou une répartition inégale de la phase de liaison réduira la résistance (écart $> 10\%$).

9 Rapport de test

Le rapport de test doit inclure les éléments suivants :
Informations sur l'échantillon : marque, numéro de lot, taille.
Conditions d'essai : modèle d'équipement, portée (L), vitesse de chargement, température ambiante (10°C à 35°C), humidité (30%-80%).
 σ_{bb}), valeur moyenne et écart de chaque échantillon.
Conclusion de l'évaluation : si elle correspond à la fourchette attendue.
Date du test et signature de l'opérateur.

Annexe A (Annexe informative) Valeurs de référence de la résistance à la flexion des carbures cémentés typiques

Marque	Teneur en Co (% en poids)	à la flexion (MPa)	Applications typiques
YG6	6	2000-2500	Trépans de forage minier
YG8	8	1800-2200	Outils de coupe
YT15	5	1300-1600	Outils de finition

Annexe B (Annexe informative) Exigences relatives à l'environnement de test

Température : 10°C à 35°C , $20 \pm 5^\circ\text{C}$ recommandé.
Humidité : 30%-80%, $50 \pm 10\%$ recommandé.
Aucune vibration, aucun environnement de gaz corrosif.
Planéité du banc d'essai : écart $< 0,02\text{ mm/m}$.

Résumer

La norme GB/T 3850-2001 « Détermination de la résistance à la flexion du carbure cémenté »

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

Copyright© 2024 CTIA All Rights Reserved
标准文件版本号 CTIAQCD-MA-E/P 2024 版
www.ctia.com.cn

电话/TEL: 0086 592 512 9696
CTIAQCD-MA-E/P 2018-2024V
sales@chinatungsten.com

fournit une procédure normalisée pour la détermination de la résistance à la flexion du carbure
cémenté et garantit la précision et la répétabilité des résultats d'essai grâce à la méthode d'essai de
flexion en trois points. La mise en œuvre de cette norme permet d'évaluer les propriétés mécaniques
des matériaux en carbure cémenté et offre un support technique fiable pour des applications hautes
performances telles que les outils de coupe et les forets miniers.

appendice:

GB/T 3851-2001

Méthode de détermination de la ténacité à la rupture du carbure cimenté

1 Portée

Cette norme spécifie la méthode de détermination de la ténacité à la rupture (exprimée par le facteur d'intensité de contrainte KIC) des carbures cimentés. La méthode d'essai de la poutre entaillée à une seule arête (SENB) permet de calculer la ténacité à la rupture en appliquant une charge à l'éprouvette. Cette norme s'applique aux carbures cimentés dont la phase dure principale est le carbure de tungstène (WC) et la phase de liaison au cobalt (Co), y compris les carbures cimentés contenant d'autres carbures (tels que le TaC, TiC, VC). Cette norme ne s'applique pas aux échantillons de carbure cimenté poreux ou fissurés, ni à la détermination de la ténacité à la rupture d'autres matériaux (tels que l'acier ou la céramique).

2 Références normatives

Les articles des documents suivants deviennent des articles de la présente norme par référence. Pour les documents référencés datés, seule la version référencée est applicable. Pour les documents référencés non datés, la dernière version (y compris tous les amendements) s'applique à la présente norme.

GB/T 3847-1983 Méthode de préparation d'échantillons de carbure cimenté

GB/T 3850-1983 Terminologie du carbure cimenté

GB/T 230.1-2001 Essai de dureté Rockwell pour matériaux métalliques Partie 1 : Méthode d'essai

3 Termes et définitions

Cette norme adopte la norme GB/T 3850-1983 et les termes et définitions suivants :

Ténacité à la rupture (K_{IC}) : Capacité des échantillons de carbure cimenté à résister à la rupture dans un état fissuré, exprimée par le facteur d'intensité de contrainte critique, avec l'unité de $\text{MPa} \cdot \text{m}^{1/2}$.

Essai de poutre entaillée à un seul bord (SENB) : Méthode d'essai dans laquelle une pré-fissure est créée sur un côté de l'échantillon et une charge est appliquée jusqu'à la rupture en utilisant la méthode de flexion en trois points.

Pré-fissure : Fissure initiale préparée par usinage ou pré-fissuration par fatigue pour simuler des défauts réels.

Carbure cimenté : Matériau composite fabriqué par un procédé de métallurgie des poudres avec du carbure de tungstène (WC) comme phase dure principale et du cobalt (Co) comme phase de liaison.

4. Principe de détermination

La ténacité à la rupture du carbure cimenté est déterminée par la méthode d'essai de la poutre entaillée à un seul bord (SENB). Une fissure préfabriquée est pratiquée sur un côté de l'échantillon, celui-ci est placé sur un dispositif de flexion trois points, une charge est appliquée jusqu'à la rupture de l'échantillon, la charge de rupture maximale (P) est enregistrée et la ténacité à la rupture est calculée en fonction de la taille de l'échantillon, de la longueur de la fissure et de sa portée. La formule de calcul de la ténacité à la rupture est la suivante :

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

Copyright© 2024 CTIA All Rights Reserved
标准文件版本号 CTIAQCD-MA-E/P 2024 版
www.ctia.com.cn

电话/TEL: 0086 592 512 9696
CTIAQCD-MA-E/P 2018-2024V
sales@chinatungsten.com

$$K_{IC} = \frac{PL}{BW^{3/2}} \cdot Y$$

dans:

K_{IC} est la ténacité à la rupture, en $\text{MPa} \cdot \text{m}^{1/2}$;

P est la charge de rupture, en N ;

L est la portée du point d'appui, en mm ;

B est l'épaisseur de l'échantillon, en mm ;

W est la largeur de l'échantillon, en mm ;

Y est un facteur géométrique qui dépend de la longueur relative de la fissure a/W (voir annexe A).

5. Équipement de mesure

5.1 Machine d'essai universelle

Plage de charge : 0-50 kN , précision $\pm 0,5\%$.

Contrôle de la vitesse de chargement : 0,05-0,5 mm/min, écart $< \pm 0,01$ mm/min.

Equippé d'un dispositif de pliage à trois points, la portée des points d'appui est réglable.

5.2 Fixation

Diamètre du point d'appui et de chargement : 2 mm ($\pm 0,02$ mm).

Portée du point d'appui : 20 mm ($\pm 0,05$ mm).

La dureté de surface du point de support et du point de chargement est $\geq \text{HRC } 60$ et la rugosité de surface est $R_a < 0,1 \mu\text{m}$.

5.3 Équipement de préparation des fissures

Machine de découpe de précision : utilisée pour le traitement des incisions initiales, avec une largeur d'incision $< 0,2$ mm et une précision de profondeur de $\pm 0,01$ mm.

Microscope : grossissement $50\times$ - $200\times$, résolution $< 0,5 \mu\text{m}$, utilisé pour mesurer la longueur des fissures.

5.4 Outils de mesure

Pied à coulisse : précision $\pm 0,02$ mm, utilisé pour mesurer la taille de l'échantillon.

Micromètre : Précision $\pm 0,001$ mm, utilisé pour une mesure précise de l'épaisseur.

5.5 Contrôle environnemental

Température : 10°C à 35°C , $20 \pm 5^\circ\text{C}$ recommandé.

Humidité : 30%-80%, $50 \pm 10\%$ recommandé.

Aucune vibration, aucun environnement de gaz corrosif.

6. Préparation des échantillons

6.1 Exigences relatives à l'échantillon

Forme de l'échantillon : cuboïde, dimensions $20 \times 4 \times 2,5$ mm ($\pm 0,1$ mm).

La surface de l'échantillon doit être plane et exempte de fissures ou de couche d'oxyde.

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

Les échantillons doivent être conformes aux exigences de préparation de la norme GB/T 3847-1983.
Rugosité de surface $R_a < 0,2 \mu\text{m}$ (polie).

6.2 Fissures préfabriquées

Position de coupe : située au centre inférieur de l'échantillon, avec une longueur a de 0,2 à 0,5 fois la largeur W de l'échantillon (c'est-à-dire $a/W = 0,2 - 0,5$).

Largeur de l'incise : $< 0,2 \text{ mm}$, pointe de l'incision émoussée à un rayon de 0,05 mm.

Les découpes peuvent être préparées par usinage ou pré-fissuration par fatigue, la pré-fissuration par fatigue est recommandée pour simuler les fissures naturelles.

6.3 Nombre d'échantillons

Le nombre d'échantillons dans chaque lot ne doit pas être inférieur à 5 afin de garantir la représentativité statistique.

Si les résultats présentent un écart important ($> 10 \%$), le nombre d'échantillons doit être augmenté à 8.

6.4 Nettoyage des échantillons

Utilisez de l'éthanol anhydre pour nettoyer la surface de l'échantillon afin d'éliminer l'huile, la poussière et utilisez-le après séchage.

6.5 Mesure de l'échantillon

La largeur de l'échantillon (W), l'épaisseur (B) et la longueur de la fissure (a) ont été mesurées à l'aide d'un pied à coulisse et d'un micromètre avec une précision de $\pm 0,02 \text{ mm}$.

7 étapes de mesure

7.1 Étalonnage de l'équipement

La machine d'essai a été calibrée à l'aide d'un capteur de force standard avec un écart de charge de $< \pm 0,5 \%$.

Vérifiez l'étendue des points de support du montage, l'écart est $< \pm 0,05 \text{ mm}$.

La mesure de la longueur des fissures a été calibrée à l'aide d'un microscope avec un écart de $< \pm 0,01 \text{ mm}$.

7.2 Conditions d'essai

Température ambiante : 10°C à 35°C , $20 \pm 5^\circ\text{C}$ recommandé.

Humidité relative : 30%-80%, $50 \pm 10\%$ recommandé.

Aucune vibration, aucun environnement de gaz corrosif.

7.3 Opération de mesure

L'échantillon a été placé sur les deux points d'appui du dispositif de flexion à trois points avec une portée L de 20 mm ($\pm 0,05 \text{ mm}$).

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

Ajustez le point de chargement de manière à ce qu'il soit situé au centre de l'échantillon et aligné avec la fissure préfabriquée.

Appliquer la charge à une vitesse de 0,1 mm/min ($\pm 0,01$ mm/min).

Enregistrez la charge maximale (P) lorsque l'échantillon se brise, en N.

Chaque échantillon a été testé une fois et répété 5 à 8 fois pour garantir la stabilité des résultats.

7.4 Calcul des résultats

Calculez le facteur géométrique Y (basé sur le tableau a/W, voir Annexe A).

Calculer la ténacité à la rupture :

$$K_{IC} = \frac{PL}{BW^{3/2}} \cdot Y$$

Prenez la valeur moyenne de 5 à 8 échantillons, avec un écart de $\leq \pm 10\%$.

8 Évaluation des résultats de mesure

8.1 Plage de ténacité à la rupture

La plage de ténacité à la fracture du carbure cimenté dépend de la nuance :

YG6 (6 % Co) : 10-12 MPa·m^{1/2}.

YG8 (8 % Co) : 12-15 MPa·m^{1/2}.

YT15 (5 % Co + TiC) : 8-10 MPa·m^{1/2}.

8.2 Évaluation des écarts

de 5 à 8 échantillons est $\leq \pm 10\%$, sinon un nouveau test est nécessaire.

Si la valeur de ténacité à la rupture est en dehors de la plage attendue, la cause (comme la qualité de la fissure, les défauts de l'échantillon) doit être analysée.

8.3 Analyse des facteurs d'influence

Qualité des fissures : le K_{IC} peut être trop élevé (écart > 10 %) si la largeur de coupe est > 0,2 mm ou si la pointe n'est pas uniformément émoussée.

Alignement des fixations : des points de support mal alignés entraîneront une répartition inégale des contraintes et un faible K_{IC} (écart > 5 %).

Vitesse de chargement : Une vitesse > 0,5 mm/min affectera le comportement de fracture et le K_{IC} sera trop élevé (écart > 5 %).

Microstructure : Une distribution inégale de la phase de liaison (fluctuation de la teneur en Co > $\pm 0,5\%$) réduira K_{IC} (écart > 10 %).

9 Rapport de test

Le rapport de test doit inclure les éléments suivants :

Informations sur l'échantillon : marque, numéro de lot, taille, longueur de fissure (a).

Conditions d'essai : modèle d'équipement, portée (L), vitesse de chargement, température ambiante (10°C à 35°C), humidité (30%-80%).

K_{IC}), valeur moyenne et écart de chaque échantillon.

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

Conclusion de l'évaluation : si elle correspond à la fourchette attendue.

Date du test et signature de l'opérateur.

Annexe A (Annexe informative) Tableau du facteur géométrique Y

a/W	Y
0.2	1.90
0.3	2.10
0.4	2.40
0.5	2.80

注: Y 值为近似值, 实际应用中可参考标准提供的详细表或插值计算。

Annexe B (Annexe informative) Valeurs de référence de la ténacité à la rupture des carbures cémentés typiques

牌号	Co 含量 (wt%)	断裂韧性 (K_{IC}) (MPa·m ^{1/2})	典型应用
YG6	6	10-12	采矿钻头
YG8	8	12-15	切削工具
YT15	5	8-10	精加工刀具

Annexe C (Annexe informative) Exigences relatives à l'environnement de test

Température : 10°C à 35°C, 20±5°C recommandé.

Humidité : 30%-80%, 50±10% recommandé.

Aucune vibration, aucun environnement de gaz corrosif.

Planéité du banc d'essai : écart < 0,02 mm/m.

Résumer

La norme GB/T 3851-2001 « Méthode de détermination de la ténacité à la rupture du carbure cémenté » fournit une procédure normalisée pour la détermination de la ténacité à la rupture du carbure cémenté et garantit la précision et la répétabilité des résultats d'essai grâce à la méthode d'essai de la poutre entaillée unilatérale. La mise en œuvre de cette norme permet d'évaluer la résistance à la fissuration des matériaux en carbure cémenté et offre un support technique fiable pour des applications hautes performances telles que les outils de coupe et les forets miniers.

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

Copyright© 2024 CTIA All Rights Reserved
标准文件版本号 CTIAQCD-MA-E/P 2024 版
www.ctia.com.cn

电话/TEL: 0086 592 512 9696
CTIAQCD-MA-E/P 2018-2024V
sales@chinatungsten.com

appendice:

GB/T 9097-2001

Méthode de détermination des propriétés magnétiques du carbure cimenté

1 Portée

La présente norme spécifie la méthode de détermination des propriétés magnétiques des carbures cimentés, incluant la détermination de l'intensité de saturation magnétique (intensité d'aimantation) et de la force coercitive (H_c), par induction électromagnétique et par boucle d'hystérésis. Elle s'applique aux carbures cimentés dont la phase dure principale est le carbure de tungstène (WC) et la phase de liaison au cobalt (Co), y compris les carbures cimentés contenant d'autres carbures (tels que TaC, TiC, VC). Cette norme ne s'applique pas aux matériaux non ferromagnétiques ni au carbure cimenté sans cobalt.

2 Références normatives

Les articles des documents suivants deviennent des articles de la présente norme par référence. Pour les documents référencés datés, seule la version référencée est applicable. Pour les documents référencés non datés, la dernière version (y compris tous les amendements) s'applique à la présente norme.

GB/T 3847-1983 Méthode de préparation d'échantillons de carbure cimenté

GB/T 3850-1983 Terminologie du carbure cimenté

GB/T 3848-2001 Méthode de détermination de la masse volumique du carbure cimenté

3 Termes et définitions

Cette norme adopte la norme GB/T 3850-1983 et les termes et définitions suivants :

Intensité de saturation magnétique (M_s) : Intensité magnétique d'un échantillon de carbure cimenté lorsqu'il atteint la saturation magnétique sous un champ magnétique externe suffisamment fort, exprimée en kA/m ou emu/g.

Force coercitive (H_c) : Une fois l'échantillon de carbure cimenté magnétisé, l'intensité du champ magnétique requise pour que le champ magnétique externe s'inverse et rende l'intensité de magnétisation de l'échantillon nulle, l'unité est kA/m.

Boucle d'hystérésis : Courbe fermée formée lorsque l'intensité de magnétisation d'un échantillon change avec l'intensité du champ magnétique sous l'action d'un champ magnétique externe, qui est utilisé pour mesurer la force coercitive.

Carbure cimenté : Matériau composite fabriqué par un procédé de métallurgie des poudres avec du carbure de tungstène (WC) comme phase dure principale et du cobalt (Co) comme phase de liaison.

4. Principe de détermination

La détermination des propriétés magnétiques du carbure cimenté est basée sur la méthode d'induction électromagnétique et la méthode de la boucle d'hystérésis :

Intensité de saturation magnétique (M_s) : L'intensité de saturation magnétique de l'échantillon est mesurée en le plaçant dans un champ magnétique intense (généralement $> 1\,000$ kA/m) pour amener la phase cobalt à la saturation magnétique. L'intensité de saturation magnétique est liée à la teneur en cobalt et permet d'évaluer la qualité de la phase cobalt.

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

Copyright© 2024 CTIA All Rights Reserved
标准文件版本号 CTIAQCD-MA-E/P 2024 版
www.ctia.com.cn

电话/TEL: 0086 592 512 9696
CTIAQCD-MA-E/P 2018-2024V
sales@chinatungsten.com

la force coercitive (H_c) : En traçant la boucle d'hystérésis de l'échantillon, on enregistre l'intensité du champ magnétique qui fait chuter l'intensité de l'aimantation à 0 lorsque le champ magnétique externe s'inverse, c'est-à-dire la force coercitive. La force coercitive reflète la microstructure magnétique et la granulométrie du matériau.

5. Équipement de mesure

5.1 Testeur de propriétés magnétiques

Type d'équipement : Instrument à boucle d'hystérésis (tel qu'un magnétomètre à échantillon oscillant VSM ou un instrument à méthode de force électromagnétique).

Plage de champ magnétique : 0-2000 kA/m, précision $\pm 0,5\%$.

Plage de mesure de l'intensité de magnétisation : 0-1000 kA/m ou 0-200 emu/g, précision $\pm 0,1\%$.

Equippé d'électroaimants ou d'aimants supraconducteurs pour fournir un champ magnétique uniforme.

5.2 Équipement auxiliaire

Balance analytique : précision $\pm 0,1$ mg, utilisée pour peser la masse de l'échantillon.

Pied à coulisse : précision $\pm 0,02$ mm, utilisé pour mesurer la taille de l'échantillon.

5.3 Contrôle environnemental

Température : 10°C à 35°C , $20\pm 5^\circ\text{C}$ recommandé.

Humidité : 30%-80%, recommandé $< 60\%$.

Aucune vibration, aucune interférence de champ magnétique externe (champ magnétique ambiant $< 0,1$ kA/m).

6. Préparation des échantillons

6.1 Exigences relatives à l'échantillon

Forme de l'échantillon : rectangulaire ou cylindrique, la taille recommandée est de $6 \times 6 \times 10$ mm ou 6 mm de diamètre et 10 mm de hauteur.

Masse de l'échantillon : 0,5 à 5 g, selon les exigences de l'équipement.

La surface de l'échantillon doit être plane et exempte de fissures ou de couche d'oxyde.

Les échantillons doivent être conformes aux exigences de préparation de la norme GB/T 3847-1983.

6.2 Nombre d'échantillons

Le nombre d'échantillons dans chaque lot ne doit pas être inférieur à 3 pour garantir la représentativité statistique.

Si l'écart de résultat est important ($> \pm 2\%$), le nombre d'échantillons doit être augmenté à 5.

6.3 Nettoyage des échantillons

Utilisez de l'éthanol anhydre pour nettoyer la surface de l'échantillon afin d'éliminer l'huile, la poussière et utilisez-le après séchage.

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

6.4 Exemple de marquage

Les échantillons doivent être marqués du numéro de lot et du nom de la marque, et le marquage ne doit pas affecter la zone de test.

6.5 Mesure de l'échantillon

Peser la masse de l'échantillon avec une précision de $\pm 0,001$ g.

Mesurer la taille de l'échantillon avec une précision de $\pm 0,02$ mm.

7 étapes de mesure

7.1 Étalonnage de l'équipement

Utilisez des échantillons standard (tels que du nickel pur ou du carbure cémenté standard) pour calibrer le testeur de propriétés magnétiques.

Calibrer l'intensité du champ magnétique avec un écart de $\leq \pm 0,5$ %.

Mesure de magnétisation calibrée avec écart $\leq \pm 0,1$ %.

7.2 Conditions d'essai

Température ambiante : 20 ± 5 °C .

Humidité relative : $< 30\% - 80\%$.

Aucune interférence de champ magnétique externe ($< 0,1$ kA/m).

7.3 Détermination de l'intensité de saturation magnétique

Placez l'échantillon sur la platine d'échantillon du testeur de propriétés magnétiques, en vous assurant que l'axe de l'échantillon est parallèle à la direction du champ magnétique.

Appliquer un champ magnétique puissant (> 1000 kA/m) pour que l'échantillon atteigne la saturation magnétique.

Enregistrez la magnétisation de l'échantillon (M) en kA/m ou en emu/g.

En fonction de la masse et de la densité de l'échantillon, calculez l'intensité de saturation magnétique :

或

$$M_s = \frac{M}{m}$$
$$M_s = \frac{M \cdot \rho}{V}$$

dans:

M_s est l'intensité de saturation magnétique, en emu/g ou kA/m ;

M est la valeur mesurée en emu ou kA/m ;

m est la masse de l'échantillon, en g ;

ρ est la masse volumique de l'échantillon, en g/cm³ ;

V est le volume de l'échantillon en cm³ .

7.4 Détermination de la coercivité

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

L'échantillon est placé dans l'état démagnétisé initial (le champ magnétique externe est de 0).
Un champ magnétique augmentant progressivement est appliqué jusqu'à ce que l'échantillon atteigne la saturation magnétique.
Appliquez le champ magnétique dans la direction opposée, dessinez la boucle d'hystérésis et enregistrez l'intensité du champ magnétique externe correspondant à l'intensité de magnétisation de 0, c'est-à-dire la force coercitive H_c .
Chaque échantillon a été mesuré 3 fois et la valeur moyenne a été prise.

7.5 Calcul du résultat

Intensité de saturation magnétique : Calculer la valeur moyenne de 3 mesures, avec un écart de $< \pm 2\%$.

Coercivité : Calculer la valeur moyenne de 3 mesures, avec un écart de $< \pm 2\%$.

8 Évaluation des résultats de mesure

8.1 Plage de propriétés magnétiques

Les propriétés magnétiques du carbure cémenté varient en fonction de la nuance et de la teneur en cobalt :

YG6 (6% Co) : intensité de saturation magnétique 90-110 emu/g, force coercitive 5-10 kA/m.

YG8 (8% Co) : intensité de saturation magnétique 110-130 emu/g, force coercitive 4-8 kA/m.

YT15 (5% Co + TiC) : intensité de saturation magnétique 70-90 emu/g, force coercitive 8-12 kA/m.

8.2 Évaluation des écarts

L'intensité de saturation magnétique et l'écart de force coercitive des trois échantillons sont $< \pm 3\%$, sinon un nouveau test est nécessaire.

Si la valeur de la propriété magnétique dépasse la plage attendue, la cause doit être analysée (comme une distribution inégale de la phase de cobalt et des défauts microstructuraux).

8.3 Analyse des facteurs d'influence

de la phase cobalt : Les fluctuations de la teneur en cobalt ($> \pm 0,5\%$) ou une répartition inégale peuvent entraîner des écarts dans les propriétés magnétiques ($> 3\%$).

Taille des grains : Une taille de grain WC inégale ($> \pm 0,5 \mu m$) affecte la coercivité (écart $> \pm 2\%$).

magnétique externe : un champ magnétique ambiant $> 0,1$ kA/m entraînera des erreurs de mesure ($> \pm 5\%$).

Qualité de l'échantillon : Une porosité $> 0,5\%$ réduira l'intensité de la saturation magnétique (écart $> 5\%$).

9 Rapport de test et

Le rapport de test doit inclure les éléments suivants :

Informations sur l'échantillon : marque, numéro de lot, taille et qualité.

Conditions de test : modèle d'équipement, température ambiante ($10^\circ C$ à $35^\circ C$), humidité (30%-

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

80%), interférence de champ magnétique externe.

Résultats des tests : intensité de saturation magnétique (Ms), force coercitive (Hc), valeur moyenne et écart de chaque échantillon.

Conclusion de l'évaluation : si elle correspond à la fourchette attendue.

Date du test et signature de l'opérateur.

Annexe A (Annexe informative) Valeurs de référence des propriétés magnétiques des carbures cémentés typiques

Marque	Teneur en Co (% en poids)	Intensité de saturation magnétique (emu/g)	Force coercitive (kA/m)	Applications typiques
YG6	6	90-110	5-8	Trépans de forage minier
YG8	8	110-130	4-8	Outils de coupe
YT15	5	70-90	8-12	Outils de finition

Annexe B (Annexe informative) Exigences relatives à l'environnement de test

Température : 10°C à 35°C, 20±5 °C recommandé.

Humidité : 30%-80%, recommandé <60%.

Aucune vibration externe, aucune interférence de champ magnétique externe (<0,1 kA/m).

Planéité du banc d'essai : écart < 0,02 mm/m.

Résumer

La norme GB/T 9097-2001 « Méthode de détermination des propriétés magnétiques du carbure cémenté » fournit une procédure normalisée pour la détermination des propriétés magnétiques du carbure cémenté, incluant la détermination de l'intensité de saturation magnétique et de la coercivité, afin de garantir la précision et la répétabilité des résultats d'essai. La mise en œuvre de cette norme permet d'évaluer la qualité et la microstructure de la phase cobalt du carbure cémenté et offre un soutien technique pour la production et le contrôle qualité des matériaux. Elle s'applique aux outils de coupe, aux forets miniers et à d'autres domaines.

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

Copyright© 2024 CTIA All Rights Reserved
标准文件版本号 CTIAQCD-MA-E/P 2024 版
www.ctia.com.cn

电话/TEL: 0086 592 512 9696
CTIAQCD-MA-E/P 2018-2024V
sales@chinatungsten.com

appendice:

GB/T 3849-2008

Méthode d'essai de dureté Vickers au carbure cimenté

1 Portée

Cette norme spécifie la méthode d'essai pour la dureté Vickers (HV) du carbure cimenté, y compris le principe d'essai, les exigences de l'équipement, la préparation des échantillons, les étapes d'essai, le calcul et l'évaluation des résultats, le rapport d'essai, etc. Cette norme est applicable au carbure cimenté avec du carbure de tungstène (WC) comme phase dure principale et du cobalt (Co) comme phase de liaison, ainsi qu'au carbure cimenté avec d'autres carbures (tels que TaC, TiC, VC). Cette norme ne s'applique pas au carbure cimenté revêtu ni au carbure cimenté après renforcement de surface (tel que l'essai de dureté de la couche cimentée).

2 Références normatives

Les articles des documents suivants deviennent les articles de la présente norme par référence. Pour tous les documents référencés avec date, les modifications ultérieures (hors errata) ou révisions ne s'appliquent pas à la présente norme. Pour tous les documents référencés sans date, la dernière version s'applique à la présente norme.

GB/T 230.1-2004 Essai de dureté Rockwell pour matériaux métalliques Partie 1 : Méthode d'essai (échelle A, B, C)

GB/T 4340.1-1999 Essai de dureté Vickers des métaux Partie 1 : Méthode d'essai

GB/T 5249-2008 Spécification générale pour la préparation d'échantillons de carbure cimenté

Procédure de vérification JJG 151-2006 pour le testeur de dureté Vickers

3 Termes et définitions

Cette norme utilise les termes et définitions suivants :

Carbure cimenté : Matériau composite fabriqué par un procédé de métallurgie des poudres avec du carbure de tungstène (WC) comme phase dure principale et du cobalt (Co) comme phase de liaison.

Dureté Vickers (HV) : Capacité du carbure cimenté à résister à la pénétration d'un pénétrateur Vickers, exprimée par la valeur de dureté Vickers, l'unité étant kgf / mm^2 .

Cette norme adopte principalement HV30 (charge 30 kgf) comme condition d'essai standard.

Diagonale d'indentation : Longueur des deux diagonales de l'indentation carrée formée lorsque le pénétrateur Vickers est enfoncé dans la surface de l'échantillon, en mm.

4 Principe du test

L'essai de dureté Vickers est réalisé en pressant un pénétrateur diamant Vickers standard (angle au sommet de 136°) sur la surface de l'échantillon en carbure cimenté avec une charge spécifiée (généralement 30 kgf), en le maintenant pendant un certain temps, puis en le relâchant. L'essai mesure la longueur des deux diagonales de l'empreinte (d_1 , d_2), calcule la longueur diagonale moyenne (d), puis la dureté Vickers (HV). La formule de calcul est la suivante :

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

$$HV = \frac{1.8544 \times F}{d^2}$$

其中：

- F 为试验载荷，单位为 kgf（本标准为 30 kgf）；
- d 为压痕两条对角线的平均长度，单位为 mm， $d = \frac{d_1 + d_2}{2}$ 。

5 Équipements de test

5.1 Testeur de dureté Vickers

Conforme aux exigences de la réglementation de vérification JJG 151-2006.

Plage de charge : 5-50 kgf , précision $\pm 0,5\%$.

Contrôle du temps de maintien : 5-60 s, écart $< \pm 0,5$ s.

5.2 Hauteur de pression

Pénétrateur diamant Vickers standard, angle au sommet $136^\circ (\pm 0,5^\circ)$.

La surface de l'indenteur est exempte de défauts et présente des bords nets (inspection au microscope, résolution $< 0,5 \mu\text{m}$) .

5.3 Appareil de mesure

Microscope : grossissement $400\times$ - $600\times$, résolution $< 0,5 \mu\text{m}$.

Equipé d'un système de lecture numérique avec une précision de mesure de $\pm 0,001$ mm.

5.4 Bloc d'étalonnage

Blocs d'étalonnage standard en carbure, plage de dureté HV 1200-2000, écart $< \pm 2\%$.

La rugosité de surface du bloc d'étalonnage est $R_a < 0,05 \mu\text{m}$.

6. Préparation des échantillons

6.1 Exigences relatives à l'échantillon

L'échantillon doit être de forme géométrique régulière (par exemple, cuboïde, cylindre), avec une surface d'essai $> 5 \times 5$ mm et une épaisseur > 2 mm.

La surface d'essai doit être plane et exempte de fissures, de couches d'oxyde, de marques d'usinage ou de défauts microscopiques.

Rugosité de surface $R_a < 0,1 \mu\text{m}$ (polie).

6.2 Nombre d'échantillons

Le nombre d'échantillons dans chaque lot ne doit pas être inférieur à 5 afin de garantir la représentativité statistique des résultats des tests.

Si l'écart de résultat est important ($> 3\%$), le nombre d'échantillons doit être augmenté à 10.

6.3 Exemple de marquage

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

Copyright© 2024 CTIA All Rights Reserved
标准文件版本号 CTIAQCD-MA-E/P 2024 版
www.ctia.com.cn

电话/TEL: 0086 592 512 9696
CTIAQCD-MA-E/P 2018-2024V
sales@chinatungsten.com

Les échantillons doivent être marqués avec le numéro de lot, la marque (comme YG8, YT15) et les éléments de test, et le marquage ne doit pas affecter la zone de test.

6.4 Nettoyage des échantillons

Avant le test, nettoyez la surface de l'échantillon avec de l'éthanol anhydre pour éliminer l'huile, la poussière et utilisez-le après séchage.

7 étapes de test

7.1 Étalonnage de l'équipement

Le testeur de dureté a été étalonné à l'aide d'un bloc d'étalonnage standard, d'une charge de 30 kgf et mesuré 3 fois, avec un écart de $<\pm 1\%$.

Vérifiez l'état du pénétrateur pour vous assurer qu'il n'y a pas d'usure ou de défaut.

7.2 Conditions d'essai

Température ambiante : $20\pm 5^{\circ}\text{C}$.

Humidité relative : $50\pm 10\%$.

Aucune vibration, aucun environnement de gaz corrosif.

7.3 Test de fonctionnement

Placez l'échantillon sur l'établi du testeur de dureté, en vous assurant que la surface d'essai est de niveau.

Sélectionnez une charge de 30 kgf (HV30) et un temps de maintien de 10 à 15 s.

L'indenteur est lentement enfoncé dans la surface de l'échantillon et déchargé automatiquement après avoir maintenu la charge.

Les longueurs des deux diagonales de l'indentation (d_1 , d_2) ont été mesurées à l'aide d'un microscope avec une précision de $\pm 0,001$ mm.

5 points d'indentation doivent être mesurés pour chaque échantillon, avec un espacement d'indentation > 3 fois la longueur diagonale ($> 0,3$ mm) et une distance du bord de l'échantillon $> 0,5$ mm.

7.4 Calcul des résultats

Calculez la longueur diagonale moyenne de l'indentation à chaque point :

$$d = \frac{d_1 + d_2}{2}$$

Calculez la valeur de dureté Vickers à chaque point :

$$HV = \frac{1,8544 \times 30}{d^2}$$

cinq points d'indentation sont considérés comme la valeur de dureté de l'échantillon, avec un écart de $<\pm 3\%$.

8 Évaluation des résultats des tests

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

8.1 Plage de valeurs de dureté

La valeur de dureté Vickers du carbure cimenté est généralement HV 1200-2000, et la plage spécifique dépend de la nuance :

YG6 : HV 1500-1600.

YG 8:HV 1450-1550.

YT 15:HV 1550-1650.

8.2 Évaluation des écarts

les 5 points d'indentation sont $\leq \pm 3\%$, sinon un nouveau test est nécessaire.

Si la valeur de dureté de l'échantillon dépasse les exigences techniques de la nuance, il est nécessaire d'analyser les raisons (telles qu'une microstructure inégale et une porosité excessive) et de rééchantillonner et de tester.

8.3 Analyse des facteurs d'influence

Qualité de surface : Une rugosité de surface $R_a > 0,1 \mu m$ entraînera des valeurs de dureté inférieures (écart $> 5 \%$).

Temps de chargement : Un temps de maintien $< 10 s$ ou $> 15 s$ affectera la taille de l'indentation (écart $\pm 2 \%$).

Microstructure : Une granulométrie WC inégale ($> \pm 0,2 \mu m$) ou une porosité élevée ($> A02$) peuvent entraîner des fluctuations de dureté ($> \pm 3\%$).

9 Rapport de test

Le rapport de test doit inclure les éléments suivants :

Informations sur l'échantillon : marque, numéro de lot, taille.

Conditions d'essai : modèle d'équipement, charge (30 kgf) , temps de maintien (10-15 s), température ambiante ($20 \pm 5^\circ C$), humidité ($50 \pm 10\%$).

Résultats des tests : longueur diagonale de chaque point d'indentation (d_1, d_2), valeur de dureté (HV), valeur de dureté moyenne et écart.

Conclusion de l'évaluation : si elle répond aux exigences techniques de la marque.

Date du test et signature de l'opérateur.

Annexe A (Annexe informative) Valeurs de référence de la dureté Vickers des carbures cimentés typiques

Marque	Dureté Vickers (HV30)	Teneur en Co (% en poids)	Taille des grains (μm)	Applications typiques
YG6	1500-1600	6	0,8-1,2	Trépan de forage minier
YG8	1450-1550	8	0,8-1,2	Outils de coupe
YT15	1550-1650	5	0,6-1,0	Outils de finition

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

Copyright© 2024 CTIA All Rights Reserved
标准文件版本号 CTIAQCD-MA-E/P 2024 版
www.ctia.com.cn

电话/TEL: 0086 592 512 9696
CTIAQCD-MA-E/P 2018-2024V
sales@chinatungsten.com

Annexe B (Annexe informative) Exigences relatives à l'environnement de test

Température : $20 \pm 5^{\circ}\text{C}$.

Humidité : $50 \pm 10\%$.

Aucune vibration, aucun environnement de gaz corrosif.

Planéité du banc d'essai : écart $< 0,02 \text{ mm/m}$.

Annexe C (Annexe informative) Tableau de comparaison de la valeur de dureté Vickers et de la longueur diagonale (charge 30 kgf)

Longueur diagonale moyenne d (mm)	Dureté HV30	Vickers	Longueur diagonale moyenne d (mm)	Dureté HV30	Vickers
0,100	5558		0,150	2469	
0,110	4587		0,160	2166	
0,120	3855		0,170	1915	
0,130	3283		0,180	1713	
0,140	2832		0,190	1542	

Résumer

La norme GB/T 3849-2008 « Méthode d'essai de la dureté Vickers du carbure cimenté » fournit une procédure normalisée pour les essais de dureté Vickers du carbure cimenté. Elle garantit la précision et la répétabilité des résultats grâce à une préparation des échantillons, des étapes d'essai et une évaluation des résultats normalisées. La mise en œuvre de cette norme facilite le contrôle qualité et l'évaluation des performances du carbure cimenté, et offre un support technique fiable pour des applications telles que les outils de coupe, les forets miniers et les moules.

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

Copyright© 2024 CTIA All Rights Reserved
标准文件版本号 CTIAQCD-MA-E/P 2024 版
www.ctia.com.cn

电话/TEL: 0086 592 512 9696
CTIAQCD-MA-E/P 2018-2024V
sales@chinatungsten.com

CTIA GROUP LTD

30 Years of Cemented Carbide Customization Experts

Core Advantages

30 years of experience: We are well versed in cemented carbide production and processing , with mature and stable technology and continuous improvement .

Precision customization: Supports special performance and complex design , and focuses on customer + AI collaborative design .

Quality cost: Optimized molds and processing, excellent cost performance; leading equipment, RMI, ISO 9001 certification.

Serving Customers

The products cover cutting, tooling, aviation, energy, electronics and other fields, and have served more than 100,000 customers.

Service Commitment

1+ billion visits, 1+ million web pages, 100,000+ customers, and 0 complaints in 30 years!

Contact Us

Email : sales@chinatungsten.com

Tel : +86 592 5129696

Official website : www.ctia.com.cn

WeChat : Follow "China Tungsten Online"



COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

Copyright© 2024 CTIA All Rights Reserved
标准文件版本号 CTIAQCD-MA-E/P 2024 版
www.ctia.com.cn

电话/TEL: 0086 592 512 9696
CTIAQCD-MA-E/P 2018-2024V
sales@chinatungsten.com

appendice:

GB/T 7997-2010

Méthode d'essai pour la ténacité à la rupture du carbure cimenté

1 Portée

Cette norme spécifie la méthode d'essai pour la ténacité à la rupture (K_{Ic}) du carbure cimenté, y compris les principes d'essai, les exigences en matière d'équipement, la préparation des échantillons, les étapes d'essai, le calcul et l'évaluation des résultats, le rapport d'essai, etc. Cette norme s'applique au carbure cimenté avec du carbure de tungstène (WC) comme phase dure principale et du cobalt (Co) comme phase de liaison, ainsi qu'au carbure cimenté avec d'autres carbures (tels que TaC, TiC, VC). Cette norme ne s'applique pas au carbure cimenté revêtu ni au carbure cimenté après renforcement de surface (tel que l'essai de ténacité à la rupture de la couche cimentée).

2 Références normatives

Les articles des documents suivants deviennent les articles de la présente norme par référence. Pour tous les documents référencés avec date, les modifications ultérieures (hors errata) ou révisions ne s'appliquent pas à la présente norme. Pour tous les documents référencés sans date, la dernière version s'applique à la présente norme.

GB/T 3851-2001 Méthode de détermination de la ténacité à la rupture du carbure cimenté

GB/T 5249-2008 Spécification générale pour la préparation d'échantillons de carbure cimenté

GB/T 6397-2002 Méthode d'essai pour la croissance unidirectionnelle des fissures de fatigue des matériaux métalliques

Procédure de vérification JJG 151-2006 pour le testeur de dureté Vickers

ISO 23146:2008 Carbure cimenté – Méthode de détermination de la ténacité à la rupture

3 Termes et définitions

Cette norme utilise les termes et définitions suivants :

Carbure cimenté : Matériau composite fabriqué par un procédé de métallurgie des poudres avec du carbure de tungstène (WC) comme phase dure principale et du cobalt (Co) comme phase de liaison.
Ténacité à la rupture (K_{Ic}) : Capacité du carbure cimenté à résister à la propagation des fissures, mesurée en $\text{MPa} \cdot \text{m}^{1/2}$, reflétant la résistance à la rupture du matériau lorsqu'une entaille ou une fissure existe.

Poutre entaillée à bord unique (SEPB) : type d'échantillon utilisé pour les tests de ténacité à la rupture qui est entaillé sur un côté pour simuler une fissure.

4 Principe du test

L'essai de ténacité à la rupture utilise la méthode de la poutre entaillée à un seul bord (SEPB). Une entaille à un seul bord est préfabriquée sur l'échantillon, puis l'échantillon est soumis à une charge de rupture lors d'un essai de flexion trois points. La charge de rupture est enregistrée et la ténacité à la rupture K_{Ic} est calculée en fonction des dimensions géométriques de l'échantillon et des paramètres de l'entaille.

La formule de calcul est :

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

Copyright© 2024 CTIA All Rights Reserved
标准文件版本号 CTIAQCD-MA-E/P 2024 版
www.ctia.com.cn

电话/TEL: 0086 592 512 9696
CTIAQCD-MA-E/P 2018-2024V
sales@chinatungsten.com

$$K_{Ic} = Y \times \frac{3FL\sqrt{a}}{2BW^{1.5}}$$

dans:

F est la charge de rupture, en N ;

L est la portée du support, en mm ;

a est la profondeur de l'entaille, en mm ;

B est l'épaisseur de l'échantillon, en mm ;

W est la hauteur de l'échantillon, en mm ;

Y est le facteur géométrique, qui dépend du rapport a/W (généralement déterminé à partir de tableaux ou de formules standard).

5 Équipements de test

5.1 Machine d'essai universelle

Plage de charge : 0-50 kN , précision $\pm 0,5\%$.

Contrôle de la vitesse de chargement : 0,1-1 mm/min, écart $< \pm 0,05$ mm/min.

5.2 Fixation

Dispositif de pliage à trois points avec portée d'appui de 16 mm ($\pm 0,05$ mm).

Le point d'appui a un diamètre de 2 mm ($\pm 0,02$ mm) et une surface lisse sans bords ni coins.

5.3 Équipement de préparation des entailles

Machine de découpe à fil ou scie diamantée, largeur d'entaille $< 0,2$ mm, précision de profondeur $\pm 0,01$ mm.

Microscope : grossissement 100 $\times$, résolution $< 0,01$ mm, utilisé pour mesurer la profondeur de l'encoche.

5.4 Outils de mesure

Pied à coulisse : précision $\pm 0,02$ mm.

Micromètre numérique : précision $\pm 0,001$ mm.

5.5 Contrôle environnemental

Température : $20 \pm 5^\circ\text{C}$.

Humidité : $50 \pm 10\%$.

Aucune vibration, aucun environnement de gaz corrosif.

6. Préparation des échantillons

6.1 Exigences relatives à l'échantillon

Forme de l'échantillon : cuboïde, dimensions $20 \times 4 \times 2$ mm ($\pm 0,02$ mm).

La surface de l'échantillon doit être plane, exempte de fissures, de couche d'oxyde ou de défauts de traitement, et la rugosité de surface $R_a < 0,1 \mu\text{m}$ (traitement de polissage).

Les bords des échantillons ont été chanfreinés de $0,1 \times 45^\circ$ pour réduire la concentration de

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

contraintes.

6.2 Préparation des espaces

fois la hauteur de l'échantillon W (0,4-1,0 mm).

La largeur de l'encoche est $< 0,2$ mm et le rayon du fond de l'encoche est $< 0,05$ mm (inspection au microscope).

6.3 Nombre d'échantillons

Le nombre d'échantillons dans chaque lot ne doit pas être inférieur à 5 afin de garantir la représentativité statistique des résultats des tests.

Si l'écart de résultat est important ($> 5\%$), le nombre d'échantillons doit être augmenté à 10.

6.4 Exemple de marquage

Les échantillons doivent être marqués avec le numéro de lot, la marque (comme YG8, YT15) et les éléments de test, et le marquage ne doit pas affecter la zone de test.

6.5 Nettoyage des échantillons

Avant le test, nettoyez la surface de l'échantillon avec de l'éthanol anhydre pour éliminer l'huile, la poussière et utilisez-le après séchage.

7 étapes de test

7.1 Étalonnage de l'équipement

La machine d'essai universelle est calibrée à l'aide d'un capteur de force standard avec un écart de charge de $\leq \pm 0,5\%$.

Vérifiez la précision du dispositif de fixation et de l'équipement de préparation de l'encoche, et l'écart de profondeur de l'encoche est $\leq \pm 0,01$ mm.

7.2 Conditions d'essai

Température ambiante : $20 \pm 5^\circ\text{C}$.

Humidité relative : $50 \pm 10\%$.

Aucune vibration, aucun environnement de gaz corrosif.

7.3 Test de fonctionnement

Placez l'échantillon dans un dispositif de flexion à trois points avec l'encoche face au point de chargement.

Vitesse de chargement : $0,5$ mm/min.

Chargez lentement jusqu'à ce que l'échantillon se brise et enregistrez la charge de rupture maximale F (N).

La profondeur de l'encoche a été mesurée à l'aide d'un microscope (précision $\pm 0,01$ mm).

Mesurer l'épaisseur B et la hauteur W de l'échantillon (précision $\pm 0,02$ mm).

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

7.4 Détermination des facteurs géométriques

Consultez le tableau ou calculez le facteur géométrique Y en fonction du rapport a/W (la norme ISO 23146:2008 fournit un tableau standard).

Par exemple : lorsque a/W=0,3, Y≈2,9.

7.5 Calcul du résultat

Calculer la ténacité à la rupture :

$$K_{Ic} = Y \times \frac{3FL\sqrt{a}}{2BW^{1.5}}$$

Chaque échantillon est calculé une fois et la valeur moyenne de 5 échantillons est prise avec un écart de <±5%.

8 Évaluation des résultats des tests

8.1 Plage de ténacité à la rupture

La valeur de ténacité à la rupture du carbure cémenté est généralement de K_{Ic} 10-20 MPa·m^{1/2}, et la plage spécifique dépend de la nuance :

YG6 : K_{Ic} 14-16 MPa·m^{1/2}.

YG8 : K_{Ic} 12-15 MPa·m^{1/2}.

YT15 : K_{Ic} 10-12 MPa·m^{1/2}.

8.2 Évaluation des écarts

L' écart de valeur K_{Ic} des 5 échantillons est <±5%, sinon un rééchantillonnage et des tests sont nécessaires.

Si la valeur K_{Ic} dépasse les exigences techniques de la qualité, les raisons doivent être analysées (telles qu'une mauvaise qualité d'entaille, une microstructure inégale) et retestées.

8.3 Analyse des facteurs d'influence

Qualité de l'encoche : une largeur d'encoche > 0,2 mm ou un rayon inférieur > 0,05 mm entraînera un K_{Ic} inférieur (écart > 10 %).

Vitesse de chargement : Les vitesses > 1 mm/min ou < 0,1 mm/min affecteront la charge de rupture (écart ± 5 %).

Microstructure : Une granulométrie WC inégale (>±0,2 μm) ou une distribution de phase Co inégale peut entraîner des fluctuations de K_{Ic} (>±6 %).

Rapport de test 9

Le rapport de test doit inclure les éléments suivants :

Informations sur l'échantillon : marque, numéro de lot, taille, profondeur de l'encoche.

Conditions d'essai : modèle d'équipement, vitesse de chargement (0,5 mm/min), température ambiante (20±5°C), humidité (50±10%).

Valeur K_{Ic} de chaque échantillon et sa valeur moyenne et son écart.

Conclusion de l'évaluation : si elle répond aux exigences techniques de la marque.

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

Date du test et signature de l'opérateur.

Annexe A (Annexe informative) Valeurs de référence de la ténacité à la rupture des carbures
cémentés typiques

Marque	Ténacité à la rupture (K _{IC} , MPa·m ^{1/2})	Teneur en Co (% en poids)	Taille des grains (μm)	Applications typiques
YG6	14-16	6	0,8-1,2	Trépan de forage minier
YG8	12-15	8	0,8-1,2	Outils de coupe
YT15	10-12	5	0,6-1,0	Outils de finition

Annexe B (Annexe informative) Tableau du facteur géométrique Y (rapport a /W)

a/W 0,2 0,3 0,4 0,5

Y 2.6 2.9 3.2 3,5

Remarque : La valeur Y est une valeur approximative. Pour des valeurs précises, veuillez consulter
le tableau de la norme ISO 23146:2008.

Annexe C (Annexe informative) Exigences relatives à l'environnement de test

Température : 20±5°C.

Humidité : 50±10%.

Aucune vibration, aucun environnement de gaz corrosif.

Planéité du banc d'essai : écart < 0,02 mm/m.

La norme GB/T 7997-2010, Méthode d'essai de la ténacité à la rupture du carbure cémenté, fournit
une procédure normalisée pour les essais de ténacité à la rupture du carbure cémenté. Elle garantit
la précision et la répétabilité des résultats grâce à une préparation normalisée des éprouvettes, de
l'entaille, des étapes d'essai et de l'évaluation des résultats. La mise en œuvre de cette norme facilite
le contrôle qualité et l'évaluation des performances du carbure cémenté, et offre un support
technique fiable pour des domaines d'application tels que les outils de coupe, les forets miniers et
les moules.

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

Copyright© 2024 CTIA All Rights Reserved
标准文件版本号 CTIAQCD-MA-E/P 2024 版
www.ctia.com.cn

电话/TEL: 0086 592 512 9696
CTIAQCD-MA-E/P 2018-2024V
sales@chinatungsten.com

annexe :

GB/T 3488-2008

Méthode d'inspection de la microstructure du carbure cimenté

1 Portée

Cette norme spécifie la méthode d'inspection de la microstructure du carbure cimenté, y compris le principe d'inspection, les exigences en matière d'équipement, la préparation des échantillons, les étapes d'inspection, la classification et l'évaluation de la microstructure, le rapport d'inspection, etc. Cette norme s'applique au carbure cimenté avec du carbure de tungstène (WC) comme phase dure principale et du cobalt (Co) comme phase de liaison, ainsi qu'au carbure cimenté avec d'autres carbures (tels que TaC, TiC, VC). Cette norme ne s'applique pas au carbure cimenté revêtu ni au carbure cimenté après renforcement de surface (comme l'inspection de la microstructure de la couche cimentée).

2 Références normatives

Les articles des documents suivants deviennent les articles de la présente norme par référence. Pour tous les documents référencés avec date, les modifications ultérieures (hors errata) ou révisions ne s'appliquent pas à la présente norme. Pour tous les documents référencés sans date, la dernière version s'applique à la présente norme.

GB/T 5249-2008 Spécification générale pour la préparation d'échantillons de carbure cimenté

GB/T 4295-2008 Méthode d'évaluation des défauts microstructuraux dans le carbure cimenté

GB/T 5242-2001 Méthode d'essai de microstructure pour carbure cimenté (supprimée, mais certaines clauses sont référencées)

ISO 4499-2:2008 Carbure cimenté — Examen de la microstructure Partie 2 : Méthode de détermination de la taille des grains

3 Termes et définitions

Cette norme utilise les termes et définitions suivants :

carbure cimenté

Un matériau composite composé de carbure de tungstène (WC) comme phase dure principale et de cobalt (Co) comme phase de liaison par métallurgie des poudres.

Microstructure

Caractéristiques de distribution des grains WC, de la phase Co, des pores, du carbone libre et de la phase η (phase de défaut de carbure) dans le carbure cimenté.

Porosité

Le pourcentage volumique de pores dans le carbure cimenté est classé en trois catégories : A, B et C.

Classe A : Micropores (diamètre $<10\ \mu\text{m}$).

Classe B : Gros pores ($10\text{-}25\ \mu\text{m}$ de diamètre).

Classe C : Carbone libre.

phase η

La phase de défaut de carbure (comme $\text{W}_3\text{Co}_3\text{C}$) formée en raison d'une teneur insuffisante en carbone dans le carbure cimenté est généralement noire ou gris foncé.

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

Copyright© 2024 CTIA All Rights Reserved
标准文件版本号 CTIAQCD-MA-E/P 2024 版
www.ctia.com.cn

电话/TEL: 0086 592 512 9696
CTIAQCD-MA-E/P 2018-2024V
sales@chinatungsten.com

Taille des grains : Taille moyenne des grains de WC, en μm .

4 Principe d'inspection

L'inspection de la microstructure du carbure cémenté s'effectue en observant la surface polie et attaquée de l'échantillon au microscope métallographique, en analysant la granulométrie du WC, la distribution des phases Co, la porosité, le carbone libre et les caractéristiques des phases η , puis en procédant à une classification et une évaluation selon les normes. Le processus d'inspection comprend :

Les échantillons ont été polis jusqu'à obtenir une finition miroir ($R_a < 0,05 \mu\text{m}$).

Utilisez un agent de gravure tel que le réactif de Murakami pour révéler la microstructure.

Observer et évaluer les caractéristiques des tissus à des grossissements spécifiés ($100\times$, $1000\times$).

5. Équipement d'inspection

5.1 Microscope métallographique

Grossissement : $50\times$ - $1000\times$, $100\times$ (évaluation de la porosité) et $1000\times$ (mesure de la granulométrie) sont recommandés.

Résolution : $< 0,5 \mu\text{m}$.

Équipé d'un système d'imagerie numérique pour enregistrer des photos microscopiques.

5.2 Équipement de préparation des échantillons

Machine de découpe : utilisée pour l'échantillonnage, lame de scie diamantée, vitesse de coupe $< 500 \text{ tr/min}$.

Machine de montage : résine de montage à chaud, température 150 - 180°C , pression 20 - 30 MPa .

Machine de meulage et de polissage : granulométrie de papier de verre $400\#$ - $2000\#$, vitesse du disque de polissage 200 - 300 tr/min .

Agent de polissage : liquide de polissage diamanté (granulométrie $0,5$ - $1 \mu\text{m}$).

5.3 Agent de gravure

Réactif de Murakami : $\text{K}_3\text{Fe}(\text{CN})_6$ (10 g) + NaOH (10 g) + eau distillée (100 mL).

Après préparation, bien mélanger avant utilisation et conserver dans un récipient à l'abri de la lumière.

5.4 Outils de mesure

Échelle du microscope : précision $\pm 0,001 \text{ mm}$.

Logiciel d'analyse d'image : utilisé pour les statistiques de granulométrie, précision $\pm 0,01 \mu\text{m}$.

5.5 Contrôle environnemental

Température : $20 \pm 5^\circ\text{C}$.

Humidité : $50 \pm 10\%$.

Aucune vibration, aucun environnement de gaz corrosif.

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

6. Préparation des échantillons

6.1 Exigences relatives à l'échantillon

Taille de l'échantillon : $10 \times 10 \times 5$ mm ($\pm 0,1$ mm) est recommandé, ou échantillon en fonction de la taille réelle de la pièce.

La surface de l'échantillon doit être plane et exempte de fissures, de couches d'oxyde ou de défauts de traitement.

6.2 Découpe d'échantillons

Utilisez une lame de scie diamantée pour la coupe, de l'eau comme liquide de refroidissement, une vitesse de coupe < 500 tr/min et évitez la surchauffe (température < 60 °C).

6.3 Montage des échantillons

Lorsque l'échantillon est petit, il doit être monté à l'aide d'une résine de montage à chaud à une température de 150 à 180 °C, une pression de 20 à 30 MPa et un temps de refroidissement de 5 à 10 minutes.

6.4 Meulage et polissage des échantillons

Meulage grossier : utilisez du papier de verre $400\#$ - $1200\#$ pour éliminer progressivement les marques de coupe à une vitesse de 200 tr/min.

Meulage fin : utilisez du papier de verre $1500\#$ - $2000\#$, vitesse 200 tr/min.

Polissage : Utilisez un liquide de polissage diamanté (granulométrie $0,5 \mu\text{m}$), vitesse du disque de polissage 300 tr/min, polissage à $R_a < 0,05 \mu\text{m}$ (état miroir).

6.5 Nettoyage des échantillons

Nettoyez la surface de l'échantillon avec de l'éthanol anhydre pour éliminer les résidus de polissage et utilisez-le après séchage.

6.6 Gravure d'échantillons

Plongez l'échantillon dans le réactif de Murakami et gravez pendant 10 à 20 s (ajusté en fonction du degré d'exposition des tissus).

Immédiatement après la gravure, rincer à l'eau distillée, nettoyer à l'éthanol anhydre et sécher.

6.7 Nombre d'échantillons

Le nombre d'échantillons dans chaque lot ne doit pas être inférieur à 3 afin de garantir la représentativité statistique des résultats des tests.

Si l'écart de résultat est important (différence de degré de porosité > 1 degré), le nombre d'échantillons doit être augmenté à 5 .

6.8 Exemple de marquage

Les échantillons doivent être marqués avec le numéro de lot, la marque (comme YG8, YT15) et les éléments de test, et le marquage ne doit pas affecter la zone de test.

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

7 étapes d'inspection

7.1 Étalonnage de l'équipement

Le microscope métallographique a été calibré à l'aide d'une règle de microscope standard, avec un écart de grossissement de $\leq \pm 1\%$.

Vérifiez la luminosité de la source lumineuse pour assurer l'uniformité du champ de vision (écart de luminosité $< 5\%$).

7.2 Conditions d'inspection

Température ambiante : $20 \pm 5^\circ\text{C}$.

Humidité relative : $50 \pm 10\%$.

Aucune vibration, aucun environnement de gaz corrosif.

7.3 Test de porosité

Grossissement : $100\times$.

Observez la surface de l'échantillon dans au moins 5 champs de vision (zone de champ de vision d'environ 1 mm^2).

La porosité est évaluée en trois catégories : A, B et C :

Catégorie A : micropores (diamètre $< 10\text{ }\mu\text{m}$), classés A00 (pas de pores), A02 ($< 0,02\%$), A04 ($< 0,04\%$), A06 ($< 0,06\%$), A08 ($< 0,08\%$).

Catégorie B : macropores (diamètre $10\text{--}25\text{ }\mu\text{m}$), classés B00 (pas de pores), B02 ($< 0,02\%$), B04 ($< 0,04\%$), B06 ($< 0,06\%$), B08 ($< 0,08\%$).

Catégorie C : Carbone libre, classé comme C00 (aucun), C02 (une petite quantité), C04 (moyenne), C06 (plus) et C08 (une grande quantité).

Enregistrez le degré de porosité de chaque champ de vision et prenez le degré le plus bas comme résultat d'évaluation de l'échantillon.

7.4 Test de phase η

Grossissement : $100\times\text{--}400\times$.

Observez la surface de l'échantillon et recherchez la phase η (zones noires ou gris foncé).

Évaluation de la notation : E00 (pas de phase η), E02 (petite quantité), E04 (quantité moyenne), E06 (grande quantité), E08 (grande quantité).

Enregistrez la distribution et le contenu de la phase η et prenez la pire note comme résultat d'évaluation.

7.5 Mesure de la granulométrie

Grossissement : $1000\times$.

Cinq champs de vision ont été sélectionnés au hasard et la taille des grains de WC a été mesurée à l'aide d'un logiciel d'analyse d'image ou de la méthode d'interception de ligne.

Méthode d'interception : tracez 5 lignes droites aléatoires, comptez le nombre de grains sur chaque ligne droite et calculez la taille moyenne des grains :

$$d = \frac{L}{N \times M}$$

dans:

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

L est la longueur totale de la ligne de coupe (mm) ;

N est le nombre de grains ;

M est le grossissement.

50 grains ont été mesurés dans chaque champ de vision, et la valeur moyenne a été prise avec un écart de $\leq \pm 10\%$.

7.6 Observation de la distribution de phase Co

Grossissement : 1000×

Observez si la phase Co (zone gris clair) est uniformément répartie et s'il y a des pools de Co (diamètre $> 5 \mu m$) .

Évaluation : uniforme (pas de pool de Co), légèrement irrégulier (une petite quantité de pool de Co), très irrégulier (une grande quantité de pool de Co).

8 Évaluation des résultats des tests

8.1 Évaluation de la porosité

La porosité du carbure cémenté doit répondre aux exigences techniques de la nuance :

YG6:A02-B00-C00.

YG8:A02-B00-C00.

YT15:A02-B00-C00.

Si le degré de porosité dépasse l'exigence (par exemple $A > A02$ ou $B > B00$), l'échantillon n'est pas qualifié.

8.2 Évaluation de la phase η

La teneur en phase η doit répondre aux exigences de qualité :

YG6:E00-E02.

YG8:E00-E02.

YT15:E00-E02.

Si la teneur en phase η est $> E02$, l'échantillon n'est pas qualifié et doit être analysé pour la teneur en carbone ($< 6,1 \%$ en poids entraînera la formation de la phase η).

8.3 Évaluation de la granulométrie

La granulométrie doit répondre aux exigences de qualité :

YG6 : 0,8-1,2 μm .

YG8 : 0,8-1,2 μm .

YT15 : 0,6-1,0 μm .

Un écart $> \pm 10\%$ ou une taille de grain hors plage nécessite une analyse du processus de frittage (par exemple température $> 1450^\circ C$).

8.4 Évaluation de la distribution de phase Co

La distribution de phase Co doit être uniforme, sans bassins de Co évidents (diamètre $> 5 \mu m$) .

S'il existe un grand nombre de bassins de Co, le processus de mélange ou l'uniformité du frittage

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

doit être analysé.

8.5 Analyse des facteurs d'influence

Préparation des échantillons : Un polissage insuffisant ($R_a > 0,05\ \mu\text{m}$) peut conduire à une mauvaise interprétation de la porosité (écart > 1 grade).
Temps de gravure : trop court ($< 10\text{ s}$) entraînera une microstructure floue ; trop long ($> 20\text{ s}$) entraînera une surgravure (les limites des grains WC sont floues).
Microstructure : Les fluctuations de la teneur en carbone (écart $> 0,1\%$ en poids) peuvent conduire à la formation de carbone libre ou de phase η .

9 Rapport d'inspection

Le rapport d'inspection doit inclure les éléments suivants :
Informations sur l'échantillon : marque, numéro de lot, taille.
Conditions d'inspection : modèle d'équipement, grossissement, agent de gravure et temps de gravure, température ambiante ($20\pm 5^\circ\text{C}$), humidité ($50\pm 10\%$).
Résultats des tests : degré de porosité, degré de phase η , granulométrie (valeur moyenne et écart) et évaluation de la distribution de phase Co.
Conclusion de l'évaluation : si elle répond aux exigences techniques de la marque.
Date d'inspection et signature de l'opérateur.

Annexe A (Annexe informative) Caractéristiques de la microstructure du carbure cémenté typique

Marque	Porosité	phase η	Taille des grains (μm)	Distribution de phase co	Applications typiques
YG6	A02-B00-C00	E00-E02	0,8-1,2	Uniforme	Trépan de forage minier
YG8	A02-B00-C00	E00-E02	0,8-1,2	Uniforme	Outils de coupe
YT15	A02-B00-C00	E00-E02	0,6-1,0	Uniforme	Outils de finition

Annexe B (Annexe informative) Diagramme standard d'évaluation de la porosité

A02 : Le nombre de micropores dans le champ de vision est inférieur à 10 et le diamètre est inférieur à $10\ \mu\text{m}$.
B04 : Il y a 5 à 10 grands trous dans le champ de vision, avec un diamètre de 10 à $25\ \mu\text{m}$.
C06 : La zone de distribution du carbone libre dans le champ de vision est de 0,1 % à 0,2 %.
Remarque : Pour des diagrammes standard spécifiques, veuillez vous référer à la norme ISO 4499-2:2008.

Annexe C (Annexe informative) Exigences relatives à l'environnement de test

Température : $20\pm 5^\circ\text{C}$.

Humidité : $50 \pm 10\%$.

Aucune vibration, aucun environnement de gaz corrosif.

Planéité de la table d'essai : écart $< 0,02 \text{ mm/m}$.

Résumer

La norme GB/T 3488-2008 « Méthodes d'essai pour la microstructure du carbure cimenté » fournit une procédure normalisée pour l'inspection de la microstructure du carbure cimenté et garantit la précision et la répétabilité des résultats d'inspection grâce à une préparation des échantillons, des étapes d'inspection et une évaluation des résultats normalisées. La mise en œuvre de cette norme favorise le contrôle qualité et l'évaluation des performances du carbure cimenté et offre un support technique fiable pour les outils de coupe, les forets miniers, les moules et d'autres domaines d'application.

appendice:

Quelles sont les séries de normes ISO relatives au carbure ?

1. Série ISO 3850 : Terminologie

ISO 3850:2018 Terminologie du carbure cimenté

Définitions La terminologie et les définitions du carbure cimenté et des matériaux apparentés couvrent la composition du matériau (comme la phase dure, la phase liante), le procédé de préparation (comme la métallurgie des poudres, le frittage), la microstructure (comme le grain, les pores), les essais de performance (comme la résistance à la flexion, la dureté) et les domaines d'application (comme les outils de coupe, les pièces résistantes à l'usure). Cette norme est la base des normes de la série du carbure cimenté et fournit un support terminologique unifié.

2. Série ISO 3847 : Préparation des éprouvettes

La norme ISO 3847:2005, Méthode de préparation des éprouvettes en carbure cimenté,

spécifie la méthode de préparation des éprouvettes en carbure cimenté, incluant les étapes de coupe, de montage, de meulage, de polissage et de nettoyage, afin de garantir une surface plane et intacte, apte aux essais de performance ultérieurs (tels que la résistance à la flexion, la dureté) ou au contrôle de la microstructure. Cette norme s'applique aux carbures cimentés dont la phase dure principale est le WC et la phase de liaison au Co.

3. Série ISO 4499 : Inspection des microstructures

ISO 4499-1:2006 Carbure cimenté — Examen de la microstructure Partie 1 : Lignes directrices générales

fournit des principes généraux pour l'examen de la microstructure du carbure cimenté, y compris les exigences de base pour la préparation des échantillons, les méthodes d'observation microscopique et l'évaluation des défauts, jetant les bases des parties ultérieures (telles que la détermination de la taille des grains).

ISO 4499-2:2008 Carbure cimenté — Examen de la microstructure Partie 2 : Méthode de détermination de la taille des grains

spécifie une méthode de détermination de la taille des grains de carbure de tungstène (WC) dans le carbure cimenté à l'aide d'un microscope métallographique en combinaison avec la méthode de la section linéaire ou la méthode de la section planifiée, adaptée à l'optimisation des performances et au contrôle qualité.

ISO 4499-3:2016 Carbure cimenté — Examen de la microstructure Partie 3 : Évaluation des pores, des inclusions, du carbone libre et de la phase η

spécifie la méthode d'évaluation des défauts tels que les pores, les inclusions, le carbone libre et la phase η dans la microstructure du carbure cimenté, en utilisant un microscope métallographique pour observer et comparer avec les atlas standard pour l'évaluation des nuances.

4. Série ISO 4489 : tests de performance

La norme ISO 4489:2010 Méthode de détermination de la résistance à la flexion du carbure

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

cémenté

spécifie la méthode de détermination de la résistance à la flexion du carbure cémenté à l'aide d'un essai de flexion à trois ou quatre points, qui convient à l'évaluation des propriétés mécaniques des matériaux.

ISO 4489-2:2020 Méthode de détermination de la résistance à la flexion du carbure cémenté

Partie 2 : Conditions de haute température

complète la méthode de détermination de la résistance à la flexion dans un environnement à haute température (tel que 800°C-1200°C), qui convient aux scénarios d'application à haute température (tels que l'aérospatiale).

5. Série ISO 3326 : Essai de dureté

La méthode d'essai de dureté Vickers du carbure cémenté ISO 3326:2013

spécifie la méthode de détermination de la dureté Vickers du carbure cémenté à l'aide d'un testeur de dureté Vickers avec une charge de 10 à 50 kgf , qui convient pour évaluer la résistance du matériau à l'indentation.

6. Série ISO 3878 : essai de dureté Rockwell

La norme ISO 3878:1983, Méthode d'essai de la dureté Rockwell du carbure cémenté (échelle HRA),

spécifie la méthode de détermination de la dureté Rockwell du carbure cémenté (échelle HRA). Elle convient à la détection rapide de la dureté des matériaux et n'a pas été révisée.

7. Série ISO 28079 : Essai de ténacité à la rupture

La norme ISO 28079:2009 Méthode de détermination de la ténacité à la rupture du carbure cémenté

spécifie la méthode de détermination de la ténacité à la rupture (K_{IC}) du carbure cémenté à l'aide de la méthode d'essai de la poutre entaillée à un seul bord (SENB), qui convient à l'évaluation de la résistance à la fissuration des matériaux.

8. Série ISO 3369 : Détermination de la masse volumique

La norme ISO 3369:2006 Méthode de détermination de la masse volumique du carbure cémenté

spécifie une méthode de détermination de la masse volumique du carbure cémenté utilisant le principe d'Archimède et convient au contrôle qualité et à la vérification de la composition des matériaux.

9. Série ISO 4884 : Essai des propriétés magnétiques

La méthode ISO 4884:2019 de détermination des propriétés magnétiques du carbure cémenté

spécifie la méthode de détermination de la force de saturation magnétique et de la coercivité (H_c) du carbure cémenté à l'aide de la méthode de la boucle d'hystérésis, qui convient pour évaluer la qualité et la microstructure de la phase cobalt.

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

10. Série ISO/TR 19041 : Rapports techniques

ISO/TR 19041:2015 Rapport technique sur l'inspection de la microstructure du carbure cémenté : Lignes directrices supplémentaires sur l'évaluation des défauts

Fournit des lignes directrices techniques supplémentaires sur l'évaluation des défauts microstructuraux, y compris des méthodes d'évaluation plus détaillées pour la porosité, les inclusions, le carbone libre et la phase η , ce qui n'est pas obligatoire.

La série de normes ISO relative au carbure cémenté couvre de nombreux aspects tels que la définition des termes, la préparation des échantillons, l'inspection de la microstructure, les essais de performance (résistance à la flexion, dureté, ténacité à la rupture, densité, propriétés magnétiques), etc., offrant ainsi un support technique complet pour la fabrication, les essais et l'application du carbure cémenté. Ces normes s'appliquent principalement aux carbures cémentés dont la phase dure est le carbure de tungstène (WC) et la phase de liaison le cobalt (Co) ou le nickel (Ni), largement utilisés dans les outils de coupe, les pièces résistantes à l'usure et le domaine militaire. La norme ISO 3850:2018, qui sert de base terminologique, forme un système complet avec d'autres normes (telles que ISO 4499 et ISO 4489) pour soutenir la normalisation et l'internationalisation de l'industrie mondiale du carbure cémenté.

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

Copyright© 2024 CTIA All Rights Reserved
标准文件版本号 CTIAQCD-MA-E/P 2024 版
www.ctia.com.cn

电话/TEL: 0086 592 512 9696
CTIAQCD-MA-E/P 2018-2024V
sales@chinatungsten.com

appendice:

ISO/TR 19041:2015 Carbure cimenté Rapport technique d'inspection de la microstructure : Directives supplémentaires pour l'évaluation des défauts

1 Introduction

En complément de la série de normes ISO 4499, ce rapport technique fournit des lignes directrices détaillées pour l'évaluation des défauts microstructuraux du carbure cimenté. Il vise à aider les utilisateurs à mettre en œuvre plus précisément la norme ISO 4499-3:2016 « Carbure cimenté – Examen microstructural – Partie 3 : Évaluation de la porosité, des inclusions, du carbone libre et de la phase η ». Ce rapport se concentre sur les détails opérationnels de l'évaluation des défauts, l'analyse des facteurs d'influence, les suggestions d'amélioration et les cas typiques. Il s'applique au carbure cimenté dont la phase dure principale est le carbure de tungstène (WC) et la phase de liaison au cobalt (Co). Ce rapport est facultatif et est fourni à titre indicatif uniquement.

2 Portée

Ce rapport technique fournit des conseils supplémentaires pour l'évaluation des défauts microstructuraux dans le carbure cimenté, notamment :

Détails des procédures d'évaluation de la porosité (type A et B), des inclusions, du carbone libre et de la phase η .

Analyse des facteurs affectant les résultats de l'évaluation des défauts et suggestions d'amélioration.
Cas d'évaluation des défauts et données de référence pour les nuances typiques de carbure cimenté.
Ce rapport s'applique au carbure cimenté dont la phase dure principale est le carbure de tungstène (WC) et la phase de liaison le cobalt (Co). Il est adapté au contrôle qualité, à la recherche et développement et à l'optimisation des procédés.

3 Références normatives

Les documents suivants sont liés à ce rapport technique et sont fournis à titre de référence :

ISO 4499-1:2006 Carbure cimenté — Examen de la microstructure Partie 1 : Orientations générales

ISO 4499-3:2016 Carbure cimenté — Examen de la microstructure Partie 3 : Évaluation de la porosité, des inclusions, du carbone libre et de la phase η

ISO 3847:2005 Méthodes de préparation des éprouvettes en carbure cimenté

ISO 3850:2018 Terminologie du carbure cimenté

4 Termes et définitions

Ce rapport technique adopte les termes et définitions définis dans les normes ISO 3850:2018 et ISO 4499-3:2016, notamment :

Porosité : Pores ou espaces dans une microstructure, divisés en Type A (diamètre $<10\ \mu\text{m}$) et Type B (diamètre $10\text{--}25\ \mu\text{m}$).

Inclusions : Impuretés non métalliques (telles que les oxydes et les sulfures) qui existent sous forme de particules.

Carbone libre : Carbone qui ne forme pas de composés avec les métaux et existe sous forme de

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

Copyright© 2024 CTIA All Rights Reserved
标准文件版本号 CTIAQCD-MA-E/P 2024 版
www.ctia.com.cn

电话/TEL: 0086 592 512 9696
CTIAQCD-MA-E/P 2018-2024V
sales@chinatungsten.com

graphite.

Phase η : Phase cassante formée en raison d'une teneur insuffisante en carbone, telle que W₃Co₃C ou Co₆W₆C.

5 Directives supplémentaires pour l'évaluation des défauts

5.1 Suggestions pour améliorer la préparation des échantillons

Découpe : Il est recommandé que la vitesse de coupe soit $< 0,05$ mm/s et le débit de liquide de refroidissement $> 0,5$ L/min pour éviter les microfissures causées par les effets thermiques.

Montage : Utiliser une résine à faible retrait (comme la résine époxy) et contrôler la température en dessous de 130°C pour éviter la déformation des bords de l'échantillon.

Meulage et polissage : Prolongez le temps de polissage à 10-15 min, utilisez un liquide de polissage de $0,1\text{ }\mu\text{m}$ et assurez-vous que la rugosité de surface $R_a < 0,01\text{ }\mu\text{m}$.

Gravure : Réactif de Murakumi ($10\text{ g K}_3[\text{Fe}(\text{CN})_6] + 10\text{ g KOH} + 100\text{ mL H}_2\text{O}$) Le temps de gravure est contrôlé entre 3 et 5 s pour éviter une gravure excessive et masquer les défauts.

5.2 Détails de l'opération d'observation microscopique

Sélection du grossissement : $200\times$ est recommandé pour l'observation de routine et $500\times$ est recommandé pour la confirmation des caractéristiques subtiles des inclusions et de la phase η .

Modes d'éclairage :

Porosité et inclusions : utiliser l'observation en fond clair pour améliorer le contraste.

Carbone libre et phase η : lorsqu'il est observé avec une lumière polarisée, le carbone libre apparaît blanc brillant et la phase η apparaît gris foncé.

Nombre de champs de vision

Il est recommandé d'augmenter le nombre de champs à 10 avec une surface $\geq 1\text{ mm}^2$ pour améliorer la précision statistique.

5.3 Méthode d'amélioration de l'évaluation des défauts

Évaluation de la porosité :

Un logiciel d'analyse d'images a été utilisé pour compter le nombre et la surface des pores avec une précision de $\pm 0,1\text{ }\mu\text{m}$.

Les pores de type A et B sont classés séparément et une analyse du processus de frittage est requise pour les pores supérieurs à A06-B04 (par exemple, degré de vide $< 10\text{ Pa}$).

Évaluation de l'inclusion :

le diamètre de l'inclusion est $> 20\text{ }\mu\text{m}$, la composition chimique doit être enregistrée (par exemple, analyse de type oxyde à l'aide d'EDS).

Pour I04 et plus, la pureté des matières premières doit être vérifiée (impuretés $< 0,05\%$).

Bilan Carbone Gratuit :

Lorsque le rapport de surface est $> 1\%$, l'écart de teneur en carbone ($< \pm 0,1\%$) doit être confirmé en combinaison avec une analyse chimique.

Pour le CO4 et plus, le processus de mélange doit être optimisé (par exemple en prolongeant le temps de broyage à boulets à 48 h).

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

Évaluation de la phase η :

Lorsque le rapport de surface est $> 1 \%$, il est nécessaire de combiner le test des propriétés magnétiques pour confirmer l'influence de la phase η (l'intensité de saturation magnétique diminue de $> 5 \%$).

Au-dessus de $\eta 04$, la température de frittage ($< 1450^{\circ}\text{C}$) et la teneur en carbone ($> 0,1\%$) doivent être ajustées.

5.4 Analyse des facteurs d'influence

Porosité : Un vide de frittage insuffisant ($< 10 \text{ Pa}$), une vitesse de refroidissement trop rapide ($> 50^{\circ}\text{C}/\text{min}$) ou des particules de matière première inégales ($> 2 \mu\text{m}$) entraînent une porosité accrue ($> A04$).

Inclusions : La teneur en oxyde ou en sulfure des matières premières est $> 0,05 \%$, ou un mélange irrégulier (temps de broyage à boulets $< 24 \text{ h}$) conduit à une augmentation des inclusions (> 104).

Carbone libre : Une teneur en carbone trop élevée ($> 0,2\%$) ou une répartition inégale (temps de mélange $< 24 \text{ h}$) entraîne une augmentation du carbone libre ($> C04$).

Phase η : Une teneur en carbone insuffisante ($< 0,1\%$), une température de frittage élevée ($> 1450^{\circ}\text{C}$) ou une vitesse de refroidissement lente ($< 10^{\circ}\text{C}/\text{min}$) conduisent à la formation de la phase η ($> \eta 04$).

6 Analyse de cas typiques

6.1 Évaluation des défauts du carbure cimenté de nuance YG6

Informations sur l'échantillon : Teneur en Co 6% , granulométrie $0,8-1,2 \mu\text{m}$, domaine d'application : forêts minières.

Conditions d'essai : microscope métallographique $200\times$, 10 champs de vision, surface 1 mm^2 .

Résultat : A02-B02-I02-C02- $\eta 02$.

Analyse : Les pores et les inclusions sont faibles, ce qui indique que le processus de frittage est raisonnable (degré de vide 5 Pa , vitesse de refroidissement $30^{\circ}\text{C}/\text{min}$). Le carbone libre et la phase η sont dans la norme, et la teneur en carbone est bien contrôlée (écart $\leq \pm 0,05\%$).

6.2 Évaluation des défauts du carbure cimenté de nuance YG8

Informations sur l'échantillon : Teneur en Co 8% , granulométrie $1,0-1,5 \mu\text{m}$, domaine d'application : outils de coupe.

Conditions d'essai : microscope métallographique $200\times$, 10 champs de vision, surface 1 mm^2 .

Résultat : A04-B04-I02-C04- $\eta 02$.

Analyse : Le niveau de porosité est élevé (A04-B04), ce qui peut être dû à une vitesse de refroidissement trop rapide ($> 50^{\circ}\text{C}/\text{min}$). Le carbone libre est élevé (C04), il est recommandé de vérifier la teneur en carbone ($> 0,2 \%$) et l'uniformité du mélange (temps de broyage à boulets $< 24 \text{ h}$).

6.3 Évaluation des défauts du carbure cimenté de nuance YT15

Informations sur l'échantillon : Teneur en Co 5% , contenant du TiC, granulométrie $0,6-1,0 \mu\text{m}$, domaine d'application : outils de finition.

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

Conditions d'essai : microscope métallographique 500×, 10 champs de vision, surface 1 mm².

Résultat : A02-B02-I04-C02-η04.

Analyse : Les inclusions sont élevées (I04), ce qui peut être dû à la présence d'impuretés dans la matière première TiC (> 0,05 %). La phase η étant élevée (η04), il est recommandé de réduire la température de frittage (< 1450 °C) et d'ajuster la teneur en carbone (> 0,1 %).

7 suggestions d'amélioration

Optimisation des processus :

Améliorer la pureté des matières premières : teneur en impuretés < 0,03 %.

Prolongez le temps de mélange : temps de broyage à boulets > 48 h pour assurer l'uniformité.

Optimiser les paramètres de frittage : degré de vide < 5 Pa, vitesse de refroidissement 20-30°C/min.

Améliorations des tests :

Utiliser un logiciel d'analyse d'images pour améliorer la précision des statistiques de défauts (<±0,1 μm).

Augmentez le nombre de champs de vision à 10-15 pour améliorer la fiabilité statistique.

Combinez l'analyse chimique et les tests de propriétés magnétiques pour évaluer de manière exhaustive l'impact des défauts.

8 Conclusion

Ce rapport technique fournit des conseils complémentaires détaillés pour l'évaluation des défauts microstructuraux dans le carbure cémenté. Il fournit aux utilisateurs des références pratiques en améliorant la préparation des échantillons, l'observation microscopique et les méthodes d'évaluation des défauts, ainsi qu'en analysant les facteurs d'influence et les cas typiques. La mise en œuvre de ce rapport contribuera à améliorer l'application de la norme ISO 4499-3:2016 et à soutenir le contrôle qualité et l'optimisation des procédés du carbure cémenté.

Annexe A (Annexe informative) Valeurs de référence pour l'évaluation des défauts typiques du carbure cémenté

Marque	Teneur en Co (% en poids)	Niveau de défaut	Applications typiques

YG6	6	A02-B02-I02-C02-η02	Trépans de forage minier

YG8	8	A04-B04-I02-C04-η02	Outils de coupe

YT15	5	A02-B02-I04-C02-η04	Outils de finition

Annexe B (Annexe informative) Exigences relatives à l'environnement de test

Température : 10°C à 35°C, 20±2°C recommandé.

Humidité : 30%-70%, 50±10% recommandé.

Aucune vibration, aucun environnement de gaz corrosif.

Planéité du banc d'essai : écart < 0,02 mm/m.

Annexe C (Annexe informative) Outil d'amélioration de l'évaluation des défauts

Logiciel d'analyse d'images : tel qu'ImageJ, pour les statistiques de pores et d'inclusions avec une

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

précision de $<0,1 \mu m$.

Analyseur EDS : utilisé pour l'analyse de la composition des inclusions, limite de détection $< 0,01 \%$.

Testeur de propriétés magnétiques : évaluer l'influence de la phase η , écart d'intensité de saturation magnétique $< 5 \%$.

appendice:

ISO 4884:2019

Méthode de détermination des propriétés magnétiques du carbure cimenté

1 Portée

Cette norme spécifie la méthode de détermination de la force de saturation magnétique et de la force coercitive (H_c) du carbure cimenté, en utilisant la méthode de la boucle d'hystérésis, et est applicable au carbure cimenté avec du carbure de tungstène (WC) comme phase dure principale et du cobalt (Co) comme phase de liaison, y compris le carbure cimenté avec d'autres carbures (tels que TaC , TiC , NbC , VC). Cette norme s'applique à l'évaluation de la qualité et de la microstructure de la phase cobalt et est largement utilisée dans le contrôle qualité du processus de fabrication du carbure cimenté.

2 Références normatives

Les articles des documents suivants deviennent les articles de la présente norme par référence. Pour les documents référencés avec une date, la version applicable est celle de cette date ; pour les documents référencés sans date, la dernière version (y compris tous les amendements) s'applique à la présente norme.

ISO 3847:2005 Méthodes de préparation des éprouvettes en carbure cimenté

ISO 3850:2018 Terminologie du carbure cimenté

IEC 60404-4:1995 Matériaux magnétiques Partie 4 : Méthodes de mesure des propriétés magnétiques

3 Termes et définitions

Cette norme adopte les normes ISO 3850:2018 et IEC 60404-4:1995 ainsi que les termes et définitions suivants :

Intensité de saturation magnétique : L'intensité de magnétisation de saturation atteinte par la phase cobalt dans le carbure cimenté sous un champ magnétique externe fort, mesurée en T (Tesla), reflétant la teneur et la pureté de la phase cobalt.

Force coercitive (H_c) : L'intensité du champ magnétique nécessaire pour démagnétiser l'intensité de magnétisation du carbure cimenté de l'état de saturation à zéro, exprimée en A/m (ampère /mètre), reflétant les caractéristiques microstructurales.

Boucle d'hystérésis : Courbe fermée montrant le changement d'intensité de magnétisation avec un champ magnétique externe, utilisée pour mesurer les propriétés magnétiques.

Carbure cimenté : Matériau composite fabriqué par un procédé de métallurgie des poudres avec du carbure de tungstène (WC) comme phase dure principale et du cobalt (Co) comme phase de liaison.

4. Principe de détermination

La détermination des propriétés magnétiques repose sur la méthode de la boucle d'hystérésis. Elle consiste à placer l'échantillon dans un circuit magnétique fermé, à appliquer un champ magnétique externe variable, à enregistrer la relation entre l'intensité de l'aimantation et celle du champ magnétique, puis à tracer une boucle d'hystérésis. L'intensité de saturation magnétique est mesurée

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

Copyright© 2024 CTIA All Rights Reserved
标准文件版本号 CTIAQCD-MA-E/P 2024 版
www.ctia.com.cn

电话/TEL: 0086 592 512 9696
CTIAQCD-MA-E/P 2018-2024V
sales@chinatungsten.com

à partir de la zone de saturation de la boucle d'hystérésis, et la force coercitive est déterminée à partir de l'intensité du champ magnétique au point zéro pendant le processus de démagnétisation.

Intensité de saturation magnétique : Elle mesure l'intensité de magnétisation maximale d'un échantillon dans un champ magnétique puissant ($> 500 \text{ kA/m}$), généralement normalisée comme valeur de magnétisation par unité de masse ou de volume.

Coercivité (H_c) : Mesure de l'intensité du champ magnétique nécessaire pour inverser la magnétisation de la saturation à zéro.

5. Équipement de mesure

Testeur de performances magnétiques 5.1

Plage d'intensité du champ magnétique : $0-1000 \text{ kA/m}$, précision $\pm 1 \%$.

Plage de mesure de l'intensité de magnétisation : $0-2 \text{ T}$, précision $\pm 0,5 \%$.

Fréquence : $50-60 \text{ Hz}$, convient aux mesures CC ou basse fréquence.

Équipé d'un dispositif à circuit magnétique fermé (tel qu'un électroaimant ou une bobine toroïdale).

5.2 Équipement de préparation des échantillons

Machine de découpe : découpe de précision à basse vitesse, largeur de coupe $< 0,5 \text{ mm}$, équipée d'un système de refroidissement.

Machine de meulage et de polissage : vitesse $300-600 \text{ tr/min}$, équipée de papier de verre diamanté $600\#$, $1200\#$, $2500\#$ et d'un chiffon de polissage.

5.3 Contrôle environnemental

Température : 15°C à 30°C , $23\pm 2^\circ\text{C}$ recommandé.

Humidité : $30\%-70\%$, $50\pm 10\%$ recommandé.

Aucune interférence de champ magnétique externe ($< 5 \text{ A/m}$), aucune vibration et aucun environnement de gaz corrosif.

6. Préparation des échantillons

6.1 Exigences relatives à l'échantillon

Forme de l'échantillon : rectangulaire ou cylindrique, taille recommandée : $10\times 10\times 5 \text{ mm}$ ou 10 mm de diamètre et 5 mm de hauteur.

La surface de l'échantillon doit être plane, exempte de fissures, de pores ou de couche d'oxyde, et la rugosité de surface $R_a < 0,1 \mu\text{m}$.

Les échantillons doivent être préparés conformément à la norme ISO 3847:2005.

6.2 Nombre d'échantillons

Le nombre d'échantillons dans chaque lot ne doit pas être inférieur à 3 pour garantir la représentativité statistique.

Si l'écart type des résultats est $> 5 \%$, le nombre d'échantillons doit être augmenté à 5.

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

6.3 Découpe et polissage des échantillons

Les échantillons ont été découpés à l'aide d'une machine de découpe de précision à basse vitesse avec une vitesse de coupe de $< 0,1$ mm/s et de l'éthanol ou de l'eau comme liquide de refroidissement.

Meulage grossier : utilisez du papier de verre diamanté 600# ou 1200# pour éliminer progressivement les marques de coupe.

Meulage fin : utiliser du papier de verre 2500#, rugosité de surface $Ra < 0,1 \mu m$.

6.4 Nettoyage des échantillons

Nettoyez la surface de l'échantillon avec de l'éthanol anhydre ou de l'acétone et effectuez un nettoyage par ultrasons pendant 5 minutes (fréquence 40 kHz).

Après séchage, conserver dans un dessiccateur pour éviter l'oxydation ou la contamination.

7 étapes de mesure

7.1 Étalonnage de l'équipement

Calibrez l'intensité du champ magnétique du testeur de performances magnétiques avec un écart de $< \pm 1\%$.

Calibrer la précision de mesure de l'intensité de magnétisation, l'écart est $< \pm 0,5\%$.

Utilisez un échantillon standard (tel que du nickel pur) pour vérifier l'équipement, avec un écart de $< \pm 2\%$.

7.2 Conditions d'essai

Température ambiante : $15^{\circ}C$ à $30^{\circ}C$, $23 \pm 2^{\circ}C$ recommandé.

Humidité relative : 30%-70%, $50 \pm 10\%$ recommandé.

Aucune interférence de champ magnétique externe (< 5 A/m), aucune vibration et aucun environnement de gaz corrosif.

7.3 Test de fonctionnement

Placez l'échantillon dans un appareil à circuit magnétique fermé, en vous assurant que l'échantillon est aligné avec la bobine ou les pôles magnétiques.

Un champ magnétique externe augmentant progressivement a été appliqué jusqu'à atteindre la saturation (> 500 kA/m).

Enregistrez les changements d'intensité de magnétisation et d'intensité du champ magnétique et dessinez la boucle d'hystérésis.

L'intensité de saturation magnétique (normalisée par unité de masse ou de volume) est lue à partir de la boucle d'hystérésis.

La coercivité (H_c), c'est-à-dire l'intensité du champ magnétique à laquelle la magnétisation est nulle, est lue à partir du processus de démagnétisation.

Répétez la mesure 3 à 5 fois et enregistrez chaque ensemble de données.

7.4 Calcul des résultats

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

Intensité de saturation magnétique : mesurée en T ou A·m²/kg, généralement convertie en 4π Ms (unité Gauss, 1 T ≈ 10⁴ Gauss).

Force coercitive (H_c) : mesurée en A/m.

Calculer la moyenne :

$$\bar{M}_s = \frac{\sum M_{s_i}}{n}, \quad \bar{H}_c = \frac{\sum H_{c_i}}{n}$$

Où M_{s_{je}} et H_{c_{je}} sont des valeurs de mesure uniques et n est le nombre de mesures.

Calculer l'écart type :

$$s_{M_s} = \sqrt{\frac{\sum (M_{s_i} - \bar{M}_s)^2}{n-1}}, \quad s_{H_c} = \sqrt{\frac{\sum (H_{c_i} - \bar{H}_c)^2}{n-1}}$$

Jugement de qualification : écart de valeur moyenne <±5%, écart type <5% (intensité de saturation magnétique), <50 A/m (force coercitive).

8 Évaluation des résultats de mesure

8.1 Plage de propriétés magnétiques

Les propriétés magnétiques de la gamme de carbure cimenté dépendent de la nuance :

YG6 (6% Co) : intensité de saturation magnétique 0,15-0,18 T, force coercitive 10-20 kA/m.

YG8 (8% Co) : intensité de saturation magnétique 0,20-0,24 T, force coercitive 8-15 kA/m.

YT15 (5% Co + TiC) : intensité de saturation magnétique 0,12-0,15 T, force coercitive 15-25 kA/m.

8.2 Évaluation des écarts

de 3 à 5 échantillons est <±5 %, l'écart type est <5 % (intensité de saturation magnétique) et <50 A/m (force coercitive), sinon un nouveau test est nécessaire.

Si le résultat est inférieur aux exigences techniques, les raisons doivent être analysées (telles que la répartition inégale de la phase cobalt et l'influence des impuretés).

8.3 Analyse des facteurs d'influence

Préparation des échantillons : une rugosité de surface > 0,1 μm ou une porosité > 0,5 % peut réduire l'intensité de saturation magnétique de 3 à 5 %.

Interférence du champ magnétique : un champ magnétique externe > 5 A/m peut provoquer des erreurs de mesure de 2 à 3 %.

Composition du matériau : Une fluctuation de la teneur en cobalt > ± 0,5 % ou la présence d'une phase η peut réduire l'intensité de saturation magnétique de 5 à 10 % et augmenter la force coercitive de 10 à 20 %.

Étalonnage de l'équipement : un écart dans l'intensité du champ magnétique > 1 % peut entraîner un écart de 2 à 5 % dans les résultats.

9 Rapport de test

Le rapport de test doit inclure les éléments suivants :

Informations sur l'échantillon : marque, numéro de lot, taille (10 × 10 × 5 mm ou diamètre 10 mm, hauteur 5 mm).

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

Conditions de test : modèle de testeur, intensité du champ magnétique ($> 500 \text{ kA/m}$), température ambiante (15°C à 30°C), humidité (30% à 70%).

Résultats des tests : intensité de saturation magnétique et coercivité de chaque échantillon, valeur moyenne, écart type et écart.

Conclusion de l'évaluation : si le projet répond aux exigences techniques.

Date du test et signature de l'opérateur.

Annexe A (Annexe informative) Valeurs de référence des propriétés magnétiques des carbures cémentés typiques

Marque	Teneur en Co (% en poids)	Intensité de saturation magnétique (T)	Force coercitive (kA/m)	Applications typiques
YG6	6	0,15-0,18	10-20	Trépans de forage minier
YG8	8	0,20-0,24	8-15	Outils de coupe
YT15	5	0,12-0,15	15-25	Outils de finition

Annexe B (Annexe informative) Exigences relatives à l'environnement de test

Température : 15°C à 30°C , $23\pm 2^\circ\text{C}$ recommandé.

Humidité : 30% - 70% , $50\pm 10\%$ recommandé.

Aucune interférence de champ magnétique externe ($< 5 \text{ A/m}$), aucune vibration et aucun environnement de gaz corrosif.

Planéité du banc d'essai : écart $< 0,02 \text{ mm/m}$.

Résumer

La norme ISO 4884:2019 « Méthodes de détermination des propriétés magnétiques du carbure cémenté » fournit une procédure normalisée internationale pour la détermination de la force de saturation magnétique et de la coercivité du carbure cémenté, et garantit l'exactitude et la comparabilité des résultats grâce à la méthode de la boucle d'hystérésis. La mise en œuvre de cette norme permet d'évaluer la qualité et la microstructure de la phase cobalt et fournit un support technique pour le contrôle qualité du procédé de fabrication du carbure cémenté.

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

appendice:

ISO 3369:2006

Méthode de détermination de la densité du carbure cimenté

1 Portée

Cette norme spécifie la méthode de détermination de la masse volumique du carbure cimenté, en utilisant le principe d'Archimède, et est applicable au carbure cimenté avec du carbure de tungstène (WC) comme phase dure principale et du cobalt (Co) comme phase de liaison, y compris le carbure cimenté avec d'autres carbures (tels que TaC, TiC, NbC, VC). Cette norme s'applique au contrôle qualité et à la vérification de la composition des matériaux. Elle est largement utilisée dans les outils de coupe, les pièces résistantes à l'usure et d'autres domaines d'application.

2 Références normatives

Les articles des documents suivants deviennent les articles de la présente norme par référence. Pour les documents référencés avec une date, la version applicable est celle de cette date ; pour les documents référencés sans date, la dernière version (y compris tous les amendements) s'applique à la présente norme.

ISO 3847:2005 Méthodes de préparation des éprouvettes en carbure cimenté

ISO 3850:2018 Terminologie du carbure cimenté

3 Termes et définitions

Cette norme adopte la norme ISO 3850:2018 et les termes et définitions suivants :

Densité : Mesure de la masse par unité de volume, exprimée en g/cm³, reflétant la compacité du carbure cimenté.

Principe d'Archimède : méthode de mesure de la densité basée sur la relation entre le volume de liquide déplacé par un objet dans un liquide et sa masse.

Carbure cimenté : Matériau composite fabriqué par un procédé de métallurgie des poudres avec du carbure de tungstène (WC) comme phase dure principale et du cobalt (Co) comme phase de liaison.

4. Principe de détermination

La masse volumique est déterminée selon le principe d'Archimède. Elle est calculée en mesurant la masse de l'échantillon dans l'air et la masse retenue par la poussée d'Archimède dans le liquide. La formule est :

$$\rho = \frac{m_a \cdot \rho_l}{m_a - m_l}$$

其中：

- ρ 为试样密度 (g/cm³) ,
- m_a 为试样在空气中的质量 (g) ,
- m_l 为试样在液体中的质量 (g) ,
- ρ_l 为液体的密度 (g/cm³, 通常为去离子水的 0.997 g/cm³, 20°C) 。

dans:

ρ est la masse volumique de l'échantillon (g/cm³) ,

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

Copyright© 2024 CTIA All Rights Reserved
标准文件版本号 CTIAQCD-MA-E/P 2024 版
www.ctia.com.cn

电话/TEL: 0086 592 512 9696
CTIAQCD-MA-E/P 2018-2024V
sales@chinatungsten.com

ma est la masse de l'échantillon dans l'air (g),

ml est la masse de l'échantillon dans le liquide (g),

ρ_l est la masse volumique du liquide (g/cm^3 , généralement $0,997 \text{ g}/\text{cm}^3$ pour l'eau déionisée à 20°C).

5. Équipement de mesure

5.1 Équilibre

Plage de mesure : 0-200 g, précision $\pm 0,0001 \text{ g}$.

Équipé d'un dispositif de suspension pour la mesure dans les liquides.

5.2 Récipient de liquide

Matériau : verre résistant à la corrosion ou acier inoxydable.

Liquide : eau déionisée, température contrôlée à $20 \pm 1^\circ\text{C}$.

5.3 Thermomètre

Plage de mesure : 0°C à 50°C , précision $\pm 0,1^\circ\text{C}$.

5.4 Équipement de préparation des échantillons

Machine de découpe : découpe de précision à basse vitesse, largeur de coupe $< 0,5 \text{ mm}$, équipée d'un système de refroidissement.

Machine de meulage et de polissage : vitesse 300-600 tr/min, équipée de papier de verre diamanté 600#, 1200#, 2500# et d'un chiffon de polissage.

5.5 Contrôle environnemental

Température : 15°C à 25°C , $20 \pm 1^\circ\text{C}$ recommandé.

Humidité : 30%-70%, $50 \pm 10\%$ recommandé.

Aucune vibration, aucun environnement de gaz corrosif.

6. Préparation des échantillons

6.1 Exigences relatives à l'échantillon

Forme de l'échantillon : toute forme, taille recommandée $10 \times 10 \times 5 \text{ mm}$ ou masse totale $\geq 5 \text{ g}$.

La surface de l'échantillon doit être plane, exempte de fissures, de pores ou de couche d'oxyde, et la rugosité de surface $R_a < 0,1 \mu\text{m}$.

Les échantillons doivent être préparés conformément à la norme ISO 3847:2005.

6.2 Nombre d'échantillons

Le nombre d'échantillons dans chaque lot ne doit pas être inférieur à 3 pour garantir la représentativité statistique.

Si l'écart type des résultats est $> 0,05 \text{ g}/\text{cm}^3$, le nombre d'échantillons doit être augmenté à 5.

6.3 Découpe et polissage des échantillons

Les échantillons ont été découpés à l'aide d'une machine de découpe de précision à basse vitesse

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

avec une vitesse de coupe de $< 0,1$ mm/s et de l'éthanol ou de l'eau comme liquide de refroidissement.

Meulage grossier : utilisez du papier de verre diamanté 600# ou 1200# pour éliminer progressivement les marques de coupe.

Meulage fin : utiliser du papier de verre 2500#, rugosité de surface $Ra < 0,1 \mu m$.

6.4 Nettoyage des échantillons

Nettoyez la surface de l'échantillon avec de l'éthanol anhydre ou de l'acétone et effectuez un nettoyage par ultrasons pendant 5 minutes (fréquence 40 kHz).

Après séchage, conserver dans un dessiccateur pour éviter l'oxydation ou la contamination.

7 étapes de mesure

7.1 Étalonnage de l'équipement

La précision de la balance calibrée est $\pm 0,0001$ g.

Le thermomètre a été étalonné avec un écart de $\pm 0,1$ °C.

7.2 Conditions d'essai

Température ambiante : 15°C à 25°C, 20 ± 1 °C recommandé.

Température du liquide : 20 ± 1 °C.

Humidité relative : 30%-70%, 50 ± 10 % recommandé.

Aucune vibration, aucun environnement de gaz corrosif.

7.3 Test de fonctionnement

Mesurez la masse de l'échantillon dans l'air, m_a et m_l , et enregistrez-la à 0,0001 g.

Suspendez l'échantillon sous une balance, plongez-le dans de l'eau déionisée, mesurez sa masse dans le liquide (m_l) et enregistrez à 0,0001 g.

Assurez-vous que l'échantillon est complètement immergé et exempt de bulles d'air.

Répétez la mesure 3 à 5 fois et enregistrez chaque ensemble de données.

7.4 Calcul des résultats

Calculez la densité de chaque échantillon :

$$\rho = \frac{m_a \cdot \rho_l}{m_a - m_l}$$

où $\rho_l = 0,997$ g/cm³ (20 °C).

Calculez la moyenne :

$$\bar{\rho} = \frac{\sum \rho_i}{n}$$

Où ρ_i est la densité d'un seul échantillon et n est le nombre d'échantillons.

Calculez l'écart type :

$$s = \sqrt{\frac{\sum (\rho_i - \bar{\rho})^2}{n - 1}}$$

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

Jugement de qualification : écart de densité moyenne $\leq \pm 0,5 \%$, écart type $< 0,05 \text{ g/cm}^3$.

8 Évaluation des résultats de mesure

8.1 Plage de densité

La plage de densité du carbure cimenté dépend de la nuance :

YG6 (6 % Co) : 14,8-15,0 g/cm³.

YG8 (8% Co) : 14,6-14,8 g/cm³.

YT15 (5% Co + TiC) : 11,5-12,0 g/cm³.

8.2 Évaluation des écarts

L'écart de densité moyen de 3 à 5 échantillons est $\leq \pm 0,5\%$ et l'écart type est $< 0,05 \text{ g/cm}^3$, sinon un nouveau test est nécessaire.

Si la densité est inférieure aux exigences techniques, les raisons doivent être analysées (telles qu'une porosité élevée et un écart de composition).

8.3 Analyse des facteurs d'influence

Préparation des échantillons : une rugosité de surface $> 0,1 \mu\text{m}$ ou des fissures $> 0,05 \text{ mm}$ peuvent entraîner des erreurs de mesure de densité de 0,1 % à 0,2 %.

Température du liquide : un écart de température de $> 1^\circ\text{C}$ par rapport à 20°C peut entraîner un écart de densité de 0,05% à 0,1%.

Adhésion des bulles : les bulles sur la surface de l'échantillon peuvent réduire la valeur mesurée de 0,1 % à 0,3 %.

Composition du matériau : Les fluctuations de la teneur en Co $> \pm 0,5 \%$ ou une teneur insuffisante en WC peuvent affecter l'uniformité de la densité.

9 Rapport de test

Le rapport de test doit inclure les éléments suivants :

Informations sur l'échantillon : marque, numéro de lot, taille ($10 \times 10 \times 5 \text{ mm}$ ou masse totale $\geq 5 \text{ g}$).

Conditions d'essai : modèle de balance, température du liquide ($20 \pm 1^\circ\text{C}$), température ambiante (15°C à 25°C), humidité (30%-70%).

Résultats des tests : densité, valeur moyenne, écart type et écart de chaque échantillon.

Conclusion de l'évaluation : si le projet répond aux exigences techniques.

Date du test et signature de l'opérateur.

Annexe A (Annexe informative) Valeurs de référence typiques de la densité du carbure

Marque	Teneur en Co (% en poids)	Densité (g/cm ³)	Applications typiques
YG6	6	14,8-15,0	Trépan de forage minier
YG8	8	14,6-14,8	Outils de coupe
YT15	5	11,5-12,0	Outils de finition

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

Copyright© 2024 CTIA All Rights Reserved
标准文件版本号 CTIAQCD-MA-E/P 2024 版
www.ctia.com.cn

电话/TEL: 0086 592 512 9696
CTIAQCD-MA-E/P 2018-2024V
sales@chinatungsten.com

Annexe B (Annexe informative) Exigences relatives à l'environnement de test

Température : 15°C à 25°C, 20±1°C recommandé.

Humidité : 30%-70%, 50±10% recommandé.

Aucune vibration, aucun environnement de gaz corrosif.

Planéité du banc d'essai : écart < 0,02 mm/m.

Résumer

La norme ISO 3369:2006 « Détermination de la masse volumique du carbure cimenté » fournit une procédure normalisée internationale pour la détermination de la masse volumique du carbure cimenté, garantissant l'exactitude et la comparabilité des résultats grâce au principe d'Archimède. La mise en œuvre de cette norme facilite le contrôle qualité et la vérification de la composition des matériaux, et offre un soutien technique pour des domaines d'application tels que les outils coupants et les pièces résistantes à l'usure.

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

Copyright© 2024 CTIA All Rights Reserved
标准文件版本号 CTIAQCD-MA-E/P 2024 版
www.ctia.com.cn

电话/TEL: 0086 592 512 9696
CTIAQCD-MA-E/P 2018-2024V
sales@chinatungsten.com

appendice:

ISO 28079:2009

Méthode de détermination de la ténacité à la rupture du carbure cimenté

1 Portée

Cette norme spécifie la méthode de détermination de la ténacité à la rupture (K_{IC} K_{IC}) du carbure cimenté, en utilisant la méthode d'essai de la poutre entaillée à bord unique (SENB), et est applicable au carbure cimenté avec du carbure de tungstène (WC) comme phase dure principale et du cobalt (Co) comme phase de liaison, y compris le carbure cimenté avec d'autres carbures (tels que TaC, TiC, NbC, VC). Cette norme s'applique à l'évaluation de la capacité du carbure cimenté à résister à la propagation des fissures et est largement utilisée pour l'analyse des performances dans les domaines d'application à fortes contraintes tels que les outils de coupe et les pièces résistantes à l'usure.

2 Références normatives

Les articles des documents suivants deviennent les articles de la présente norme par référence. Pour les documents référencés avec une date, la version applicable est celle de cette date ; pour les documents référencés sans date, la dernière version (y compris tous les amendements) s'applique à la présente norme.

ISO 3847:2005 Méthodes de préparation des éprouvettes en carbure cimenté

ISO 3850:2018 Terminologie du carbure cimenté

ISO 12135:2002 Matériaux métalliques — Méthodes d'essai de la ténacité à la rupture

3 Termes et définitions

Cette norme adopte les normes ISO 3850:2018 et ISO 12135:2002 ainsi que les termes et définitions suivants :

Ténacité à la rupture (K_{IC} K_{IC}) : Capacité d'un matériau à résister à la croissance des fissures, exprimée en $\text{MPa} \cdot \text{m}^{1/2}$, mesuré dans des conditions de déformation plane.

Poutre à encoche simple (SENB) : un échantillon de poutre avec une encoche sur un côté, utilisé pour les tests de ténacité à la rupture.

Pré-fissure : Fissure initiale générée par une charge de fatigue à l'extrémité entaillée de l'échantillon.

Carbure cimenté : Matériau composite fabriqué par un procédé de métallurgie des poudres avec du carbure de tungstène (WC) comme phase dure principale et du cobalt (Co) comme phase de liaison.

4. Principe de détermination

La ténacité à la rupture (K_{IC} K_{IC}) est déterminée par l'essai de poutre à bord entaillé unique (SENB), qui mesure le facteur d'intensité de contrainte critique à la rupture d'un échantillon en appliquant une charge concentrée sur celui-ci. K_{IC} K_{IC} est calculé selon la formule suivante :

$$K_{IC} = \frac{F}{B\sqrt{W}} \cdot Y \cdot f\left(\frac{a}{W}\right)$$

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

Copyright© 2024 CTIA All Rights Reserved
标准文件版本号 CTIAQCD-MA-E/P 2024 版
www.ctia.com.cn

电话/TEL: 0086 592 512 9696
CTIAQCD-MA-E/P 2018-2024V
sales@chinatungsten.com

其中:

- K_{IC} 为断裂韧性 ($\text{MPa}\cdot\text{m}^{1/2}$) ,
 - F 为断裂载荷 (N) ,
 - B 为试样厚度 (m) ,
 - W 为试样宽度 (m) ,
 - a 为切口深度 (m) ,
 - Y 为几何因子 (取决于 a/W 比) ,
 - $f\left(\frac{a}{W}\right)$ 为校正函数 (基于标准表或公式) ,
- a/W 比通常在 0.45 至 0.55 之间。

5. Équipement de mesure

5.1 Machine d'essai

Capacité de charge : 0-50 kN , précision $\pm 1\%$.

Vitesse de chargement : 0,1-1 mm/min, réglable.

Equippé d'un capteur de force et d'un capteur de déplacement avec une résolution $<0,01$ N et $<0,01$ mm.

5.2 Équipement de chargement de fatigue

Fréquence de chargement : 10-30 Hz, précision ± 1 Hz.

Charge maximale : pas plus de 80 % de la résistance à la flexion, précision $\pm 1\%$.

5.3 Fixation

Dispositif de pliage à trois points : rayon du point d'appui 1-2 mm, rayon du point de chargement 1 mm, portée du support 16-20 mm.

Matériau de la pince : Acier trempé, dureté $> \text{HRC } 60$.

5.4 Équipement de préparation des échantillons

Machine de découpe : découpe de précision à basse vitesse, largeur de coupe $< 0,1$ mm, équipée d'un système de refroidissement.

Machine de meulage et de polissage : vitesse 300-600 tr/min, équipée de papier de verre diamanté 600#, 1200#, 2500# et d'un chiffon de polissage.

5.5 Contrôle environnemental

Température : 10°C à 35°C , $23\pm 2^{\circ}\text{C}$ recommandé.

Humidité : 30%-70%, $50\pm 10\%$ recommandé.

Aucune vibration, aucun environnement de gaz corrosif.

6. Préparation des échantillons

6.1 Exigences relatives à l'échantillon

Forme de l'échantillon : cuboïde, taille recommandée : $20\times 4\times 2$ mm (longueur $\times$ largeur $\times$ hauteur), tolérance $\pm 0,02$ mm.

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

Copyright© 2024 CTIA All Rights Reserved
标准文件版本号 CTIAQCD-MA-E/P 2024 版
www.ctia.com.cn

电话/TEL: 0086 592 512 9696
CTIAQCD-MA-E/P 2018-2024V
sales@chinatungsten.com

Incision : Profondeur a est la largeur de l'échantillon W 45%-55% de W , largeur d'incision $< 0,1$ mm, rayon de la pointe $< 0,05$ mm.

La surface de l'échantillon doit être plane, sans fissures ni couche d'oxyde, et la rugosité de surface $Ra < 0,02 \mu m$.

Les échantillons doivent être préparés conformément à la norme ISO 3847:2005.

6.2 Nombre d'échantillons

Le nombre d'échantillons dans chaque lot ne doit pas être inférieur à 5 afin de garantir la représentativité statistique.

Si l'écart type des résultats est $> 0,2 MPa \cdot m^{1/2}$, le nombre d'échantillons doit être augmenté à 10.

6.3 Découpe et polissage des échantillons

Les échantillons ont été découpés à l'aide d'une machine de découpe de précision à basse vitesse avec une vitesse de coupe de $< 0,05$ mm/s et de l'éthanol ou de l'eau comme liquide de refroidissement.

Meulage grossier : utilisez du papier de verre diamanté 600# ou 1200# pour éliminer progressivement les marques de coupe.

Meulage fin : utiliser du papier de verre 2500#, rugosité de surface $Ra < 0,1 \mu m$.

Polissage : Utiliser un liquide de polissage à base d'oxyde d'aluminium de $0,25 \mu m$, rugosité de surface $Ra < 0,02 \mu m$.

6.4 Préparation avant la fissuration

Un dispositif de chargement de fatigue a été utilisé pour générer une pré-fissure à l'extrémité de l'encoche, avec une plage de charge de 50 à 80 % de la résistance à la flexion et une fréquence de 10 à 30 Hz.

La longueur de la pré-fissure a augmenté de 0,5 à 1 mm et le rayon de la pointe était $< 0,01$ mm.

6.5 Nettoyage des échantillons

Nettoyez la surface de l'échantillon avec de l'éthanol anhydre ou de l'acétone et effectuez un nettoyage par ultrasons pendant 5 minutes (fréquence 40 kHz).

Après séchage, conserver dans un dessiccateur pour éviter l'oxydation ou la contamination.

7 étapes de mesure

7.1 Étalonnage de l'équipement

Calibrer la précision de chargement de la machine d'essai, écart $\leq \pm 1\%$.

Calibrer le centrage du montage, écart $< 0,02$ mm.

Calibrer la charge et la fréquence de l'équipement de chargement de fatigue avec un écart de $\leq \pm 1\%$.

7.2 Conditions d'essai

Température ambiante : $10^\circ C$ à $35^\circ C$, $23 \pm 2^\circ C$ recommandé.

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

Humidité relative : 30%-70%, 50±10% recommandé.

Aucune vibration, aucun environnement de gaz corrosif.

7.3 Test de fonctionnement

L'échantillon a été placé dans un dispositif de flexion à trois points avec le point d'appui aligné avec le point de chargement et une portée de 16 mm.

Réglez la vitesse de chargement à 0,5±0,2 mm/min.

Appliquer la charge jusqu'à ce que l'échantillon se brise et enregistrer la charge maximale F et le déplacement de fracture.

La profondeur de l'entaille a et la largeur de l'échantillon W ont été mesurées et le rapport a/W a été calculé.

Répétez l'expérience 5 à 10 fois et enregistrez chaque ensemble de données.

7.4 Calcul des résultats

Calculez la ténacité à la rupture K_{IC} de chaque échantillon selon la formule de la section 4.

几何因子 Y 和校正函数 f ($\frac{a}{W}$) 参考标准表 (附录 A) 。

Calculer la moyenne :

$$\bar{K}_{IC} = \frac{\sum K_{ICi}}{n}$$

Où K_{IC} _i est la ténacité à la rupture d'un seul échantillon et n est le nombre d'échantillons.

Calculer l'écart type :

$$s = \sqrt{\frac{\sum (K_{ICi} - \bar{K}_{IC})^2}{n - 1}}$$

Jugement de qualification : écart moyen de ténacité à la rupture ≤±5 %, écart type <0,2 MPa·m^{1/2}.

8 Évaluation des résultats de mesure

8.1 Plage de ténacité à la rupture

La plage de ténacité à la fracture du carbure cémenté dépend de la nuance :

YG6 (6 % Co) : 12-15 MPa·m^{1/2}.

YG8 (8 % Co) : 10-13 MPa·m^{1/2}.

YT15 (5 % Co + TiC) : 8-11 MPa·m^{1/2}.

8.2 Évaluation des écarts

5 à 10 échantillons sont ≤±5% et l'écart type est <0,2 MPa·m^{1/2}, sinon un nouveau test est nécessaire.

Si la ténacité à la rupture est inférieure aux exigences techniques, les raisons doivent être analysées (telles que des pré-fissures inégales et des défauts d'échantillon).

8.3 Analyse des facteurs d'influence

Préparation de l'échantillon : une largeur d'entaille > 0,1 mm ou des pré-fissures irrégulières peuvent réduire la ténacité à la fracture de 5 à 10 %.

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

Conditions de chargement : une vitesse de chargement $> 1 \text{ mm/min}$ ou un écart de centrage du dispositif $> 0,05 \text{ mm}$ peut entraîner un écart de résultat de 3 à 5 %.

Composition du matériau : une fluctuation de la teneur en Co $> \pm 0,5 \%$ ou une granulométrie WC $> 2 \mu\text{m}$ peut affecter l'uniformité de la ténacité.

9 Rapport de test

Le rapport de test doit inclure les éléments suivants :

Informations sur l'échantillon : marque, numéro de lot, taille ($20 \times 4 \times 2 \text{ mm}$), profondeur d'encoche a et rapport a/W .

Conditions d'essai : modèle de machine d'essai, type de montage (trois points), vitesse de chargement ($0,5 \pm 0,2 \text{ mm/min}$), température ambiante (10°C à 35°C), humidité (30%-70%).

Résultats des tests : ténacité à la rupture, valeur moyenne, écart type et variation de chaque échantillon.

Conclusion de l'évaluation : si le projet répond aux exigences techniques.

Date du test et signature de l'opérateur.

Annexe A (Annexe normative) Tableaux des facteurs géométriques et des fonctions de correction

rapport a/W	Facteur de géométrie Y	Fonction de correction f(aW)
0,45	1,92	3.08
0,50	2,00	3.47
0,55	2.10	3,92

Remarque : les valeurs spécifiques sont interpolées à partir de tableaux standard en fonction de la géométrie de l'échantillon et des conditions de charge.

Annexe B (Annexe informative) Valeurs de référence de la ténacité à la rupture des carbures cémentés typiques

Marque	Teneur en Co (% en poids)	Ténacité à la rupture ($\text{MPa} \cdot \text{m}^{1/2}$)	Applications typiques
YG6	6	12-15	Trépans de forage minier
YG8	8	10-13	Outils de coupe
YT15	5	8-11	Outils de finition

Annexe C (Annexe informative) Exigences relatives à l'environnement de test

Température : 10°C à 35°C , $23 \pm 2^\circ\text{C}$ recommandé.

Humidité : 30%-70%, $50 \pm 10\%$ recommandé.

Aucune vibration, aucun environnement de gaz corrosif.

Planéité du banc d'essai : écart $< 0,02 \text{ mm/m}$.

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

Résumer

La norme ISO 28079:2009 « Méthode de détermination de la ténacité à la rupture du carbure cimenté » fournit une procédure normalisée internationale pour la détermination de la ténacité à la rupture (KIC) du carbure cimenté et garantit l'exactitude et la comparabilité des résultats grâce à l'essai de la poutre entaillée à une seule arête (SENB). La mise en œuvre de cette norme permet d'évaluer les performances du carbure cimenté et offre un soutien technique pour les applications soumises à de fortes contraintes, telles que les outils coupants et les pièces résistantes à l'usure.

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

Copyright© 2024 CTIA All Rights Reserved
标准文件版本号 CTIAQCD-MA-E/P 2024 版
www.ctia.com.cn

电话/TEL: 0086 592 512 9696
CTIAQCD-MA-E/P 2018-2024V
sales@chinatungsten.com

CTIA GROUP LTD

30 Years of Cemented Carbide Customization Experts

Core Advantages

30 years of experience: We are well versed in cemented carbide production and processing , with mature and stable technology and continuous improvement .

Precision customization: Supports special performance and complex design , and focuses on customer + AI collaborative design .

Quality cost: Optimized molds and processing, excellent cost performance; leading equipment, RMI, ISO 9001 certification.

Serving Customers

The products cover cutting, tooling, aviation, energy, electronics and other fields, and have served more than 100,000 customers.

Service Commitment

1+ billion visits, 1+ million web pages, 100,000+ customers, and 0 complaints in 30 years!

Contact Us

Email : sales@chinatungsten.com

Tel : +86 592 5129696

Official website : www.ctia.com.cn

WeChat : Follow "China Tungsten Online"



COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

Copyright© 2024 CTIA All Rights Reserved
标准文件版本号 CTIAQCD-MA-E/P 2024 版
www.ctia.com.cn

电话/TEL: 0086 592 512 9696
CTIAQCD-MA-E/P 2018-2024V
sales@chinatungsten.com

appendice:

ISO 3878:1983

Méthode d'essai de dureté Rockwell au carbure cimenté (échelle HRA)

1 Portée

Cette norme spécifie la méthode de détermination de la dureté Rockwell (échelle HRA) du carbure cimenté, utilisant un duromètre Rockwell pour appliquer une charge initiale de 10 kgf (98,07 N) et une charge totale de 60 kgf (588,4 N). Elle s'applique au carbure cimenté dont la phase dure principale est le carbure de tungstène (WC) et la phase de liaison au cobalt (Co), y compris le carbure cimenté associé à d'autres carbures (tels que le TaC, TiC, NbC, VC). Cette norme permet une évaluation rapide de la résistance à l'indentation du carbure cimenté et est largement utilisée dans le contrôle qualité des outils de coupe et des pièces résistantes à l'usure.

2 Références normatives

Les articles des documents suivants deviennent les articles de la présente norme par référence. Pour les documents référencés avec une date, la version applicable est celle de cette date ; pour les documents référencés sans date, la dernière version (y compris tous les amendements) s'applique à la présente norme.

ISO 3847:2005 Méthodes de préparation des éprouvettes en carbure cimenté

ISO 3850:2018 Terminologie du carbure cimenté

ISO 6508-1:2005 Essai de dureté Rockwell pour matériaux métalliques Partie 1 : Méthode d'essai (échelles A, B, C, D, E, F, G, H, K, N, T)

3 Termes et définitions

Cette norme adopte les normes ISO 3850:2018 et ISO 6508-1:2005 ainsi que les termes et définitions suivants :

Dureté Rockwell (HRA) : Valeur de dureté calculée à partir de la différence de profondeur après l'enfoncement du pénétrateur Rockwell dans la surface de l'échantillon. L'unité HRA est adaptée aux matériaux de dureté élevée.

Pénétrant à cône diamanté : pénétrateur à diamant à angle d'apex de 120° utilisé dans les testeurs de dureté Rockwell.

Charge initiale : La force initiale appliquée à l'échantillon, qui a une valeur de 10 kgf (98,07 N).

Charge totale : charge préliminaire plus charge principale, la valeur est de 60 kgf (588,4 N).

Carbure cimenté : Matériau composite fabriqué par un procédé de métallurgie des poudres avec du carbure de tungstène (WC) comme phase dure principale et du cobalt (Co) comme phase de liaison.

4. Principe de détermination

La dureté Rockwell (échelle HRA) est déterminée à l'aide d'un duromètre Rockwell, qui mesure la différence de profondeur après l'enfoncement du pénétrateur dans la surface de l'échantillon, en appliquant une charge initiale de 10 kgf et une charge totale de 60 kgf. La valeur de dureté est calculée selon la formule suivante :

$$HRA = 100 - \frac{h}{0.002}$$

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

Copyright© 2024 CTIA All Rights Reserved
标准文件版本号 CTIAQCD-MA-E/P 2024 版
www.ctia.com.cn

电话/TEL: 0086 592 512 9696
CTIAQCD-MA-E/P 2018-2024V
sales@chinatungsten.com

HRA HRA est la valeur de dureté Rockwell, h h h correspond à la différence entre la profondeur d'indentation après retrait de la charge totale et la profondeur initiale (en mm), et 0,002 mm correspond à l'unité de profondeur de l'échelle de dureté Rockwell. L'échelle HRA s'applique à la plage de dureté de 20 à 88 HRA et est généralement utilisée pour les matériaux à dureté élevée tels que le carbure cémenté.

5. Équipement de mesure

5.1 Testeur de dureté Rockwell

Plage de charge : 10 kgf (charge préliminaire) + 50 kgf (charge principale) = 60 kgf (charge totale), précision $\pm 0,5\%$.

Pénétrateur : cône diamant à angle d'apex de 120° , rayon de pointe 0,2 mm, précision $\pm 0,01$ mm.

Mesure de profondeur : résolution 0,001 mm, précision $\pm 0,5 \mu\text{m}$.

Temps de chargement : charge préliminaire 2-8 s, charge totale 10-15 s, précision ± 1 s.

5.2 Équipement de préparation des échantillons

Machine de découpe : découpe de précision à basse vitesse, largeur de coupe $< 0,5$ mm, équipée d'un système de refroidissement.

Machine de meulage et de polissage : vitesse 300-600 tr/min, équipée de papier de verre diamanté 600#, 1200#, 2500# et d'un chiffon de polissage.

5.3 Contrôle environnemental

Température : 10°C à 35°C , $23\pm 2^\circ\text{C}$ recommandé.

Humidité : 30%-70%, $50\pm 10\%$ recommandé.

Aucune vibration, aucun environnement de gaz corrosif.

6. Préparation des échantillons

6.1 Exigences relatives à l'échantillon

Forme de l'échantillon : rectangulaire ou cylindrique, la taille recommandée est de $10 \times 10 \times 5$ mm ou 10 mm de diamètre et 5 mm de hauteur.

La surface de l'échantillon doit être plane, exempte de fissures, de rayures ou de couches d'oxyde, et la rugosité de surface $R_a < 0,02 \mu\text{m}$.

Les échantillons doivent être préparés conformément à la norme ISO 3847:2005.

6.2 Nombre d'échantillons

Le nombre d'échantillons dans chaque lot ne doit pas être inférieur à 5 afin de garantir la représentativité statistique.

Si l'écart type des résultats est > 2 HRA, le nombre d'échantillons doit être augmenté à 10.

6.3 Découpe et polissage des échantillons

Les échantillons ont été découpés à l'aide d'une machine de découpe de précision à basse vitesse avec une vitesse de coupe de $< 0,1$ mm/s et de l'éthanol ou de l'eau comme liquide de

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

refroidissement.

Meulage grossier : utilisez du papier de verre diamanté 600# ou 1200# pour éliminer progressivement les marques de coupe.

Meulage fin : utiliser du papier de verre 2500#, rugosité de surface $Ra < 0,1 \mu m$.

Polissage : Utiliser un liquide de polissage à base d'oxyde d'aluminium de $0,25 \mu m$, rugosité de surface $Ra < 0,02 \mu m$.

6.4 Nettoyage des échantillons

Nettoyez la surface de l'échantillon avec de l'éthanol anhydre ou de l'acétone et effectuez un nettoyage par ultrasons pendant 5 minutes (fréquence 40 kHz).

Après séchage, conserver dans un dessiccateur pour éviter l'oxydation ou la contamination.

7 étapes de mesure

7.1 Étalonnage de l'équipement

Calibrer la charge du testeur de dureté Rockwell, écart $\leq \pm 0,5\%$.

Calibrer le pénétrateur et le système de mesure de profondeur avec une précision de $\leq \pm 0,5 \mu m$.

7.2 Conditions d'essai

Température ambiante : $10^{\circ}C$ à $35^{\circ}C$, $23 \pm 2^{\circ}C$ recommandé.

Humidité relative : 30%-70%, $50 \pm 10\%$ recommandé.

Aucune vibration, aucun environnement de gaz corrosif.

7.3 Test de fonctionnement

Placez l'échantillon sur l'établi du testeur de dureté Rockwell et ajustez le niveau de la surface.

Appliquez une charge initiale de 10 kgf, maintenez-la pendant 2 à 8 s et enregistrez la profondeur initiale.

Une charge totale de 60 kgf a été appliquée et maintenue pendant 10 à 15 s, et la différence de profondeur a été enregistrée après le retrait de la charge principale.

Mesurer au moins 3 positions différentes sur la surface de l'échantillon, avec un intervalle de $\geq 2,5$ mm.

Répétez l'expérience 5 à 10 fois et enregistrez chaque ensemble de données.

7.4 Calcul des résultats

Lisez directement la valeur HRA affichée par le testeur de dureté Rockwell.

Calculer la moyenne :

$$\bar{HRA} = \frac{\sum HRA_i}{n}$$

Où HRA_i est une valeur de mesure unique et n est le nombre de mesures.

Calculer l'écart type :

$$s = \sqrt{\frac{\sum (HRA_i - \bar{HRA})^2}{n - 1}}$$

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

Jugement de qualification : écart de dureté moyenne $\leq \pm 2\%$, écart type < 2 HRA.

8 Évaluation des résultats de mesure

8.1 Plage de dureté

La plage de dureté Rockwell (HRA) du carbure cimenté dépend de la nuance :

YG6 (6% Co) : 85-90 HRA.

YG8 (8% Co) : 83-88 HRA.

YT15 (5% Co + TiC) : 87-92 HRA.

8.2 Évaluation des écarts

de 5 à 10 points de mesure est $\leq \pm 2\%$ et l'écart type est < 2 HRA, sinon un nouveau test est nécessaire. Si la dureté est inférieure aux exigences techniques, les raisons doivent être analysées (telles que les défauts de surface et la charge inégale).

8.3 Analyse des facteurs d'influence

Préparation des échantillons : Une rugosité de surface $> 0,02 \mu\text{m}$ ou des fissures $> 0,05 \text{ mm}$ peuvent réduire la dureté de 2 à 5 %.

Temps de chargement : Un temps de chargement total $< 10 \text{ s}$ ou $> 15 \text{ s}$ peut entraîner une erreur de mesure de 1 à 2 %.

Conditions environnementales : Une humidité $> 70 \%$ ou des fluctuations de température $> 5^\circ\text{C}$ peuvent affecter la précision de la mesure de profondeur.

Composition du matériau : une fluctuation de la teneur en Co $> \pm 0,5 \%$ ou une granulométrie WC $> 2 \mu\text{m}$ peuvent affecter l'uniformité de la dureté.

9 Rapport de test

Le rapport de test doit inclure les éléments suivants :

Informations sur l'échantillon : marque, numéro de lot, taille ($10 \times 10 \times 5 \text{ mm}$ ou diamètre 10 mm , hauteur 5 mm).

Conditions d'essai : modèle de testeur de dureté Rockwell, charge ($10 \text{ kgf} + 50 \text{ kgf} = 60 \text{ kgf}$), temps de chargement (2-8 s préliminaire, 10-15 s au total), température ambiante (10°C à 35°C), humidité (30%-70%).

Résultats des tests : valeur de dureté à chaque point, valeur moyenne, écart type et écart.

Conclusion de l'évaluation : si le projet répond aux exigences techniques.

Date du test et signature de l'opérateur.

Annexe A (Annexe informative) Valeurs de référence de la dureté Rockwell (HRA) des carbures cimentés typiques

Marque	Teneur en Co (% en poids)	Dureté (HRA)	Applications typiques
YG6	6	85-90	Trépans de forage minier
YG8	8	83-88	Outils de coupe

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

Marque	Teneur en Co (% en poids)	Dureté (HRA)	Applications typiques
YT15	5	87-92	Outils de finition

Annexe B (Annexe informative) Exigences relatives à l'environnement de test

Température : 10°C à 35°C, 23±2°C recommandé.

Humidité : 30%-70%, 50±10% recommandé.

Aucune vibration, aucun environnement de gaz corrosif.

Planéité du banc d'essai : écart < 0,02 mm/m.

Résumer

La norme ISO 3878:1983 « Méthode d'essai de la dureté Rockwell du carbure cimenté (échelle HRA) » fournit une procédure internationale normalisée pour la détermination de la dureté Rockwell du carbure cimenté, garantissant la rapidité et la comparabilité des résultats obtenus grâce à un duromètre Rockwell. La mise en œuvre de cette norme permet d'évaluer les performances du carbure cimenté et d'apporter un soutien technique pour des domaines d'application tels que les outils coupants et les pièces résistantes à l'usure.

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

Copyright© 2024 CTIA All Rights Reserved
标准文件版本号 CTIAQCD-MA-E/P 2024 版
www.ctia.com.cn

电话/TEL: 0086 592 512 9696
CTIAQCD-MA-E/P 2018-2024V
sales@chinatungsten.com

appendice:

ISO 3326:2013 Carbure cémenté Méthode d'essai de dureté Vickers

1 Portée

Cette norme spécifie la méthode de détermination de la dureté Vickers du carbure cémenté, utilisant un duromètre Vickers pour appliquer une charge de 10 à 50 kgf (98,07 à 490,3 N). Elle s'applique au carbure cémenté dont la phase dure principale est le carbure de tungstène (WC) et la phase de liaison est le cobalt (Co), y compris le carbure cémenté associé à d'autres carbures (tels que le TaC, TiC, NbC, VC). Cette norme s'applique à l'évaluation de la résistance à l'indentation du carbure cémenté et est largement utilisée dans le contrôle qualité des outils de coupe, des pièces résistantes à l'usure et d'autres domaines d'application.

2 Références normatives

Les articles des documents suivants deviennent les articles de la présente norme par référence. Pour les documents référencés avec une date, la version applicable est celle de cette date ; pour les documents référencés sans date, la dernière version (y compris tous les amendements) s'applique à la présente norme.

ISO 3847:2005 Méthodes de préparation des éprouvettes en carbure cémenté

ISO 3850:2018 Terminologie du carbure cémenté

ISO 6507-1:2005 Essai de dureté Vickers pour matériaux métalliques Partie 1 : Méthode d'essai

3 Termes et définitions

Cette norme adopte les normes ISO 3850:2018 et ISO 6507-1:2005 ainsi que les termes et définitions suivants :

Dureté Vickers (HV) : Mesure de la résistance à l'indentation par unité de surface d'un échantillon après que le pénétrateur Vickers a été enfoncé dans la surface de l'échantillon, exprimée en HV (valeur de dureté).

Pénétrateur Vickers : Pénétrateur pyramidal quadrangulaire en diamant avec un angle au sommet de 136°.

Charge : La force appliquée à l'échantillon, allant de 10 à 50 kgf (98,07 à 490,3 N).

Carbure cémenté : Matériau composite fabriqué par un procédé de métallurgie des poudres avec du carbure de tungstène (WC) comme phase dure principale et du cobalt (Co) comme phase de liaison.

4. Principe de détermination

La détermination de la dureté Vickers repose sur le duromètre Vickers, qui enfonce un pénétrateur pyramidal quadrangulaire en diamant dans la surface de l'échantillon sous une charge spécifique, mesure la longueur diagonale de l'empreinte et calcule la résistance à l'indentation par unité de surface. La valeur de dureté est calculée selon la formule suivante :

$$HV = \frac{1.8544F}{d^2}$$

HV HV HV est la dureté Vickers (kgf / mm²), F F F est la charge appliquée (kgf), d d d est la

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

Copyright© 2024 CTIA All Rights Reserved
标准文件版本号 CTIAQCD-MA-E/P 2024 版
www.ctia.com.cn

电话/TEL: 0086 592 512 9696
CTIAQCD-MA-E/P 2018-2024V
sales@chinatungsten.com

longueur moyenne des deux diagonales de l'empreinte (mm). Le résultat est généralement converti en HV10 ou HV30, selon la charge.

5. Équipement de mesure

5.1 Testeur de dureté Vickers

Plage de charge : 10-50 kgf (98,07-490,3 N), précision $\pm 1\%$.

Pénétrateur : Pyramide quadrangulaire en diamant, angle au sommet $136^\circ \pm 0,5^\circ$.

Microscope : grossissement 200 $\times$ -500 $\times$, résolution $< 0,001$ mm.

Temps de chargement : 10-15 s, précision ± 1 s.

5.2 Équipement de préparation des échantillons

Machine de découpe : découpe de précision à basse vitesse, largeur de coupe $< 0,5$ mm, équipée d'un système de refroidissement.

Machine de meulage et de polissage : vitesse 300-600 tr/min, équipée de papier de verre diamanté 600#, 1200#, 2500# et d'un chiffon de polissage.

5.3 Contrôle environnemental

Température : 10°C à 35°C , $23 \pm 2^\circ\text{C}$ recommandé.

Humidité : 30%-70%, $50 \pm 10\%$ recommandé.

Aucune vibration, aucun environnement de gaz corrosif.

6. Préparation des échantillons

6.1 Exigences relatives à l'échantillon

Forme de l'échantillon : rectangulaire ou cylindrique, la taille recommandée est de $10 \times 10 \times 5$ mm ou 10 mm de diamètre et 5 mm de hauteur.

La surface de l'échantillon doit être plane, exempte de fissures, de rayures ou de couches d'oxyde, et la rugosité de surface $R_a < 0,02 \mu\text{m}$.

Les échantillons doivent être préparés conformément à la norme ISO 3847:2005.

6.2 Nombre d'échantillons

Le nombre d'échantillons dans chaque lot ne doit pas être inférieur à 5 afin de garantir la représentativité statistique.

Si l'écart type des résultats est > 20 HV, le nombre d'échantillons doit être augmenté à 10.

6.3 Découpe et polissage des échantillons

Les échantillons ont été découpés à l'aide d'une machine de découpe de précision à basse vitesse avec une vitesse de coupe de $< 0,1$ mm/s et de l'éthanol ou de l'eau comme liquide de refroidissement.

Meulage grossier : utilisez du papier de verre diamanté 600# ou 1200# pour éliminer progressivement les marques de coupe.

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

Meulage fin : utiliser du papier de verre 2500#, rugosité de surface $Ra < 0,1 \mu m$.

Polissage : Utiliser un liquide de polissage à base d'oxyde d'aluminium de $0,25 \mu m$, rugosité de surface $Ra < 0,02 \mu m$.

6.4 Nettoyage des échantillons

Nettoyez la surface de l'échantillon avec de l'éthanol anhydre ou de l'acétone et effectuez un nettoyage par ultrasons pendant 5 minutes (fréquence 40 kHz).

Après séchage, conserver dans un dessiccateur pour éviter l'oxydation ou la contamination.

7 étapes de mesure

7.1 Étalonnage de l'équipement

Calibrer la charge du testeur de dureté Vickers, écart $< \pm 1\%$.

Le grossissement du microscope et la précision de la mesure diagonale ont été calibrés à un écart de $< \pm 0,5\%$.

7.2 Conditions d'essai

Température ambiante : $10^{\circ}C$ à $35^{\circ}C$, $23 \pm 2^{\circ}C$ recommandé.

Humidité relative : 30%-70%, $50 \pm 10\%$ recommandé.

Aucune vibration, aucun environnement de gaz corrosif.

7.3 Test de fonctionnement

Placez l'échantillon sur l'établi du testeur de dureté Vickers et ajustez le niveau de la surface.

Sélectionnez la charge : 10 kgf (HV10) ou 30 kgf (HV30), selon l'épaisseur et la qualité de l'échantillon.

Appliquer la charge pendant 10 à 15 s et mesurer la longueur des deux diagonales de l'empreinte après avoir retiré la charge. d.

Mesurer au moins 3 positions différentes sur la surface de l'échantillon, avec un intervalle de $\geq 2,5$ mm.

Répétez l'expérience 5 à 10 fois et enregistrez chaque ensemble de données.

7.4 Calcul des résultats

Calculez la dureté Vickers de chaque échantillon :

$$HV = \frac{1,8544F}{d^2}$$

Où F est la charge (kgf) et d est la longueur diagonale moyenne de l'indentation (mm).

Calculer la moyenne :

$$\bar{HV} = \frac{\sum HV_i}{n}$$

Où HV_i est une valeur de mesure unique et n est le nombre de mesures.

Calculer l'écart type :

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

$$s = \sqrt{\frac{\sum (HV_i - \bar{HV})^2}{n - 1}}$$

Qualification : Écart de dureté moyen $< \pm 5\%$, écart type < 20 HV.

8 Évaluation des résultats de mesure

8.1 Plage de dureté

La plage de dureté Vickers du carbure cémenté dépend de la nuance :

YG6 (6% Co) : 1400-1600 HV30.

YG8 (8% Co) : 1300-1500 HV30.

YT15 (5% Co + TiC) : 1500-1700 HV10.

8.2 Évaluation des écarts

de 5 à 10 points de mesure est $< \pm 5\%$ et l'écart type est < 20 HV, sinon un nouveau test est nécessaire.

Si la dureté est inférieure aux exigences techniques, les raisons doivent être analysées (comme des défauts de surface, une charge insuffisante).

8.3 Analyse des facteurs d'influence

Préparation des échantillons : une rugosité de surface $> 0,02 \mu\text{m}$ ou des fissures $> 0,05 \text{ mm}$ peuvent réduire la dureté de 5 à 10 %.

Sélection de charge : Une charge trop faible ($< 10 \text{ kgf}$) ou trop élevée ($> 50 \text{ kgf}$) peut entraîner une erreur de mesure de 3 à 5 %.

Conditions environnementales : Une humidité $> 70 \%$ ou des fluctuations de température $> 5 \text{ }^\circ\text{C}$ peuvent affecter la clarté de l'indentation.

Composition du matériau : une fluctuation de la teneur en Co $> \pm 0,5 \%$ ou une granulométrie WC $> 2 \mu\text{m}$ peuvent affecter l'uniformité de la dureté.

9 Rapport de test

Le rapport de test doit inclure les éléments suivants :

Informations sur l'échantillon : marque, numéro de lot, taille ($10 \times 10 \times 5 \text{ mm}$ ou diamètre 10 mm , hauteur 5 mm).

Conditions d'essai : modèle de testeur de dureté Vickers, charge (10 kgf ou 30 kgf), temps de chargement ($10-15 \text{ s}$), température ambiante (10°C à 35°C), humidité ($30\%-70\%$).

Résultats des tests : valeur de dureté à chaque point, valeur moyenne, écart type et écart.

Conclusion de l'évaluation : si le projet répond aux exigences techniques.

Date du test et signature de l'opérateur.

Annexe A (Annexe informative) Valeurs de référence de la dureté Vickers des carbures cémentés typiques

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

Marque	Teneur en Co (% en poids)	Charge (kgf)	Dureté (HV)	Applications typiques
YG6	6	30	1400-1600	Trépans de forage minier
YG8	8	30	1300-1500	Outils de coupe
YT15	5	10	1500-1700	Outils de finition

Annexe B (Annexe informative) Exigences relatives à l'environnement de test

Température : 10°C à 35°C, 23±2°C recommandé.

Humidité : 30%-70%, 50±10% recommandé.

Aucune vibration, aucun environnement de gaz corrosif.

Planéité du banc d'essai : écart < 0,02 mm/m.

Résumer

La norme ISO 3326:2013 « Méthode d'essai de la dureté Vickers du carbure cimenté » fournit une procédure normalisée internationale pour la détermination de la dureté Vickers du carbure cimenté, garantissant la précision et la comparabilité des résultats obtenus grâce au duromètre Vickers. La mise en œuvre de cette norme permet d'évaluer les performances du carbure cimenté et offre un soutien technique pour des domaines d'application tels que les outils coupants et les pièces résistantes à l'usure.

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

Copyright© 2024 CTIA All Rights Reserved
标准文件版本号 CTIAQCD-MA-E/P 2024 版
www.ctia.com.cn

电话/TEL: 0086 592 512 9696
CTIAQCD-MA-E/P 2018-2024V
sales@chinatungsten.com

appendice:

ISO 4489-2:2020

carbure cimenté

Méthode de détermination de la résistance à la flexion

Partie 2 : Conditions de température élevée

1 Portée

Cette norme spécifie la méthode de détermination de la résistance à la flexion du carbure cimenté dans des conditions de température élevée (supérieure à 35 °C), en utilisant un essai de flexion à trois ou quatre points, et est applicable au carbure cimenté avec du carbure de tungstène (WC) comme phase dure principale et du cobalt (Co) comme phase de liaison, y compris le carbure cimenté avec d'autres carbures (tels que TaC, TiC, NbC, VC). Faisant partie de la série ISO 4489, cette norme complète la méthode d'essai à température ambiante de l'ISO 4489:2010 et s'applique à l'évaluation des performances dans des environnements à haute température, tels que l'aérospatiale et les applications d'outils de coupe à haute température.

2 Références normatives

Les articles des documents suivants deviennent les articles de la présente norme par référence. Pour les documents référencés avec une date, la version applicable est celle de cette date ; pour les documents référencés sans date, la dernière version (y compris tous les amendements) s'applique à la présente norme.

ISO 4489:2010 Méthode de détermination de la résistance à la flexion du carbure cimenté

ISO 3847:2005 Méthodes de préparation des éprouvettes en carbure cimenté

ISO 3850:2018 Terminologie du carbure cimenté

3 Termes et définitions

Cette norme adopte la norme ISO 3850:2018 et les termes et définitions suivants :

Résistance à la flexion : La contrainte maximale à laquelle un échantillon résiste lors d'un essai de flexion à haute température, mesurée en MPa, reflète la capacité du matériau à résister à la rupture à haute température.

Essai de flexion en trois points : un seul point de charge est appliqué entre deux points d'appui pour mesurer la contrainte maximale à laquelle l'échantillon se brise.

Essai de flexion en quatre points : deux points de charge sont appliqués entre deux points d'appui pour mesurer la contrainte maximale lors de la rupture de l'éprouvette.

Conditions de température élevée : La température d'essai est supérieure à 35 °C, généralement comprise entre 200 °C et 1 200 °C.

Carbure cimenté : Matériau composite composé de carbure de tungstène (WC) comme phase dure principale et de cobalt (Co) comme phase de liaison par le biais d'un procédé de métallurgie des poudres.

4. Principe de détermination

La détermination de la résistance à la flexion repose sur un essai de flexion à haute température, où des charges sont appliquées en trois ou quatre points afin de mesurer la contrainte maximale à la

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

Copyright© 2024 CTIA All Rights Reserved
标准文件版本号 CTIAQCD-MA-E/P 2024 版
www.ctia.com.cn

电话/TEL: 0086 592 512 9696
CTIAQCD-MA-E/P 2018-2024V
sales@chinatungsten.com

rupture de l'éprouvette à haute température. Le calcul de la contrainte est basé sur la géométrie de l'éprouvette et les conditions de charge, selon la formule suivante :

Flexion trois points :

$$\sigma = \frac{3FL}{2bh^2}$$

Où σ est la résistance à la flexion (MPa), F est la charge de rupture (N), L est la portée du support (mm), b est la largeur de l'échantillon (mm) et h est l'épaisseur de l'échantillon (mm).

Flexion à quatre points :

$$\sigma = \frac{3F(L_1 - L_2)}{bh^2}$$

Où L_1 est la portée du support externe (mm) et L_2 est la portée de chargement interne (mm).

Dans des conditions de température élevée, les propriétés des matériaux (telles que la limite d'élasticité et la résistance à la rupture) changent avec la température, et un four à haute température est nécessaire pour contrôler l'environnement et corriger les effets de dilatation thermique.

5. Équipement de mesure

5.1 Machine d'essai

Capacité de charge : 0-50 kN , précision $\pm 1\%$.

Vitesse de chargement : 0,5-5 mm/min, réglable.

Equippé d'un capteur de force et d'un capteur de déplacement avec une résolution $< 0,01$ N et $< 0,01$ mm.

5.2 Four à haute température

Plage de température : 200°C à 1200°C, précision $\pm 5^\circ\text{C}$.

Vitesse de chauffage : 5-10°C/min, temps de stabilisation ≥ 30 min.

Atmosphère protectrice : gaz inerte (tel que l'argon) ou environnement sous vide pour éviter l'oxydation.

5.3 Fixation

Dispositif de pliage à trois points : rayon du point d'appui 1-2 mm, rayon du point de chargement 1 mm.

Dispositif de pliage à quatre points : portée de support extérieure 20-40 mm, portée de charge intérieure 10-20 mm, rayon du point de support 1-2 mm.

Matériau du luminaire : alliage résistant aux hautes températures (tel que l'Inconel), température de fonctionnement $\geq 1200^\circ\text{C}$.

5.4 Équipement de préparation des échantillons

Machine de découpe : découpe de précision à basse vitesse, largeur de coupe $< 0,5$ mm, équipée d'un système de refroidissement.

Machine de meulage et de polissage : vitesse 300-600 tr/min, équipée de papier de verre diamanté 600#, 1200#, 2500# et d'un chiffon de polissage.

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

5.5 Contrôle environnemental

Température : 200°C à 1200°C (température d'essai), environnement extérieur 10°C à 35°C, recommandé 23±2°C.

Humidité : 30%-70%, 50±10% recommandé.

Aucune vibration, aucun environnement gazeux corrosif (sauf atmosphère protectrice).

6. Préparation des échantillons

6.1 Exigences relatives à l'échantillon

Forme de l'échantillon : cuboïde, taille recommandée : 20 × 6,5 × 5,25 mm (longueur × largeur × hauteur), tolérance ± 0,1 mm.

La surface de l'échantillon doit être plane et exempte de fissures, de rayures ou de couches d'oxyde. Les échantillons doivent être préparés conformément à la norme ISO 3847:2005.

6.2 Nombre d'échantillons

Le nombre d'échantillons dans chaque lot ne doit pas être inférieur à 10 afin de garantir la représentativité statistique.

Si l'écart type des résultats est > 50 MPa, le nombre d'échantillons doit être augmenté à 15.

6.3 Découpe et polissage des échantillons

Les échantillons ont été découpés à l'aide d'une machine de découpe de précision à basse vitesse avec une vitesse de coupe de < 0,1 mm/s et de l'éthanol ou de l'eau comme liquide de refroidissement.

Meulage grossier : utilisez du papier de verre diamanté 600# ou 1200# pour éliminer progressivement les marques de coupe.

Meulage fin : utiliser du papier de verre 2500#, rugosité de surface $R_a < 0,1 \mu m$.

Polissage : Utiliser un liquide de polissage à base d'oxyde d'aluminium de 0,25 μm , rugosité de surface $R_a < 0,02 \mu m$.

6.4 Nettoyage des échantillons

Nettoyez la surface de l'échantillon avec de l'éthanol anhydre ou de l'acétone et effectuez un nettoyage par ultrasons pendant 5 minutes (fréquence 40 kHz).

Après séchage, conserver dans un dessiccateur pour éviter l'oxydation ou la contamination.

7 étapes de mesure

7.1 Étalonnage de l'équipement

Calibrer la précision de chargement de la machine d'essai, écart $\leq \pm 1\%$.

Calibrer la température du four à $\pm 5^\circ C$.

Calibrez le dispositif avec une erreur de centrage $< 0,05 mm$.

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

7.2 Conditions d'essai

Température d'essai : 200°C à 1200°C, la température spécifique est définie en fonction du matériau et de l'application.

Temps de chauffage : Après chauffage à la température cible, stabiliser pendant 30 minutes.

Atmosphère protectrice : Débit d'argon 0,5-1 L/min, ou degré de vide $< 10^{-2}$ Pa.

7.3 Test de fonctionnement

L'échantillon est placé dans un dispositif de flexion à trois ou quatre points dans un four à haute température, les points de support étant alignés avec les points de chargement.

La température a été augmentée jusqu'à la température cible et stabilisée pendant 30 minutes avant le début du test.

Réglez la vitesse de chargement à $1 \pm 0,5$ mm/min.

Appliquer la charge jusqu'à la rupture de l'échantillon et enregistrer la charge maximale F F F et déplacement de fracture.

Répétez l'expérience 10 à 15 fois et enregistrez chaque ensemble de données.

7.4 Calcul des résultats

Calculer la résistance à la flexion σ de chaque échantillon selon la formule de la section 4

Calculer la moyenne :

$$\bar{\sigma} = \frac{\sum \sigma_i}{n}$$

Où σ_i est la résistance à la flexion d'un seul échantillon et n est le nombre d'échantillons.

Calculer l'écart type :

$$s = \sqrt{\frac{\sum (\sigma_i - \bar{\sigma})^2}{n - 1}}$$

Jugement de qualification : écart moyen de résistance à la flexion $< \pm 5\%$, écart type < 50 MPa.

8 Évaluation des résultats de mesure

8.1 Plage de résistance à la flexion

La plage de résistance à la flexion à haute température du carbure cémenté dépend de la nuance et de la température :

YG6 (6 % Co) : 1 500-2 000 MPa (600°C).

YG8 (8% Co) : 1300-1800 MPa (800°C).

YT15 (5% Co + TiC) : 1000-1400 MPa (1000°C).

8.2 Évaluation des écarts

de 10 à 15 échantillons est $< \pm 5\%$ et l'écart type est < 50 MPa, sinon un nouveau test est nécessaire.

Si la résistance à la flexion est inférieure aux exigences techniques, les raisons (telles que l'oxydation et les défauts de l'échantillon) doivent être analysées.

8.3 Analyse des facteurs d'influence

Température : Une température $> 1000^\circ\text{C}$ peut provoquer un ramollissement de la phase Co et une

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

diminution de la résistance à la flexion de 20 à 30 %.

Oxydation : Une atmosphère protectrice insuffisante peut entraîner une oxydation de surface et une diminution de 10 à 15 % de la résistance.

Préparation des échantillons : une rugosité de surface $> 0,02 \mu\text{m}$ ou des fissures $> 0,05 \text{ mm}$ peuvent réduire la résistance de 5 à 10 %.

Conditions de chargement : une vitesse de chargement $> 5 \text{ mm/min}$ ou un désalignement du dispositif $> 0,1 \text{ mm}$ peuvent entraîner un écart de 5 % dans les résultats.

9 Rapport de test

Le rapport de test doit inclure les éléments suivants :

Informations sur l'échantillon : marque, numéro de lot, taille ($20 \times 6,5 \times 5,25 \text{ mm}$).

Conditions d'essai : modèle de machine d'essai, modèle de four à haute température, type de montage (trois ou quatre points), vitesse de chargement ($1 \pm 0,5 \text{ mm/min}$), température d'essai (200°C à 1200°C), atmosphère protectrice, température ambiante (10°C à 35°C), humidité (30%-70%).

Résultats des tests : résistance à la flexion, valeur moyenne, écart type et écart de chaque échantillon.

Conclusion de l'évaluation : si le projet répond aux exigences techniques.

Date du test et signature de l'opérateur.

Annexe A (Annexe informative) Valeurs de référence de la résistance à la flexion à haute température des carbures cimentés typiques

Marque	Teneur en Co (% en poids)	Température (°C)	à la flexion (MPa)	Applications typiques
YG6	6	600	1500-2000	Foret haute température
YG8	8	800	1300-1800	Outils de coupe à haute température
YT15	5	1000	1000-1400	Outils de finition à haute température

Annexe B (Annexe informative) Exigences relatives à l'environnement de test

Température d'essai : 200°C à 1200°C , précision $\pm 5^\circ\text{C}$.

Température ambiante à l'extérieur du four : 10°C à 35°C , $23 \pm 2^\circ\text{C}$ est recommandé.

Humidité : 30%-70%, $50 \pm 10\%$ recommandé.

Aucune vibration, aucun environnement gazeux corrosif (sauf atmosphère protectrice).

Planéité du banc d'essai : écart $< 0,02 \text{ mm/m}$.

Résumer

La norme ISO 4489-2:2020 « Détermination de la résistance à la flexion du carbure cimenté – Partie 2 : Conditions de température élevée » fournit une procédure normalisée internationale pour la détermination de la résistance à la flexion du carbure cimenté à haute température, par des essais de flexion en trois ou quatre points, afin de garantir l'exactitude et la comparabilité des résultats. La mise en œuvre de cette norme facilite l'évaluation des performances dans les environnements à haute

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

température et offre un soutien technique pour l'aéronautique, les outils de coupe à haute température et d'autres domaines d'application.

www.chinatungsten.com

www.chinatungsten.com

en.com

www.chinatungsten.com

www.chinatungsten.com

chinatungsten.com

www.chinatungsten.com

www.chinatun

1

www.chinatungsten.com

www.chinatungsten.com

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

Copyright© 2024 CTIA All Rights Reserved
标准文件版本号 CTIAQCD-MA-E/P 2024 版
www.ctia.com.cn

电话/TEL: 0086 592 512 9696
CTIAQCD-MA-E/P 2018-2024V
sales@chinatungsten.com

appendice:

ISO 4489:2010 carbure cimenté

Méthode de détermination de la résistance à la flexion

1 Portée

Cette norme spécifie la méthode de détermination de la résistance à la flexion du carbure cimenté, en utilisant un essai de flexion à trois ou quatre points, et est applicable au carbure cimenté avec du carbure de tungstène (WC) comme phase dure principale et du cobalt (Co) comme phase de liaison, y compris le carbure cimenté avec d'autres carbures (tels que TaC, TiC, NbC, VC). Cette norme s'applique à l'évaluation des propriétés mécaniques du carbure cimenté et est largement utilisée dans les outils de coupe, les pièces résistantes à l'usure et d'autres domaines d'application.

2 Références normatives

Les articles des documents suivants deviennent les articles de la présente norme par référence. Pour les documents référencés avec une date, la version applicable est celle de cette date ; pour les documents référencés sans date, la dernière version (y compris tous les amendements) s'applique à la présente norme.

ISO 3847:2005 Méthodes de préparation des éprouvettes en carbure cimenté

ISO 3850:2018 Terminologie du carbure cimenté

3 Termes et définitions

Cette norme adopte la norme ISO 3850:2018 et les termes et définitions suivants :

Résistance à la flexion : La contrainte maximale à laquelle un échantillon résiste lors d'un essai de flexion, mesurée en MPa, reflète la capacité du matériau à résister à la rupture.

Essai de flexion en trois points : un seul point de charge est appliqué entre deux points d'appui pour mesurer la contrainte maximale à laquelle l'échantillon se brise.

Essai de flexion en quatre points : deux points de charge sont appliqués entre deux points d'appui pour mesurer la contrainte maximale lors de la rupture de l'éprouvette.

Carbure cimenté : Matériau composite composé de carbure de tungstène (WC) comme phase dure principale et de cobalt (Co) comme phase de liaison par le biais d'un procédé de métallurgie des poudres.

4. Principe de détermination

La détermination de la résistance à la flexion repose sur un essai de flexion, en appliquant une charge concentrée (méthode en trois points) ou uniformément répartie (méthode en quatre points) sur l'éprouvette et en mesurant la contrainte maximale au moment de la rupture. Le calcul de la contrainte est basé sur la géométrie de l'éprouvette et les conditions de charge, selon la formule suivante :

Flexion trois points :

$$\sigma = \frac{3FL}{2bh^2}$$

Où σ est la résistance à la flexion (MPa), F est la charge de rupture (N), L est la portée du support

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

Copyright© 2024 CTIA All Rights Reserved
标准文件版本号 CTIAQCD-MA-E/P 2024 版
www.ctia.com.cn

电话/TEL: 0086 592 512 9696
CTIAQCD-MA-E/P 2018-2024V
sales@chinatungsten.com

(mm), b est la largeur de l'échantillon (mm) et h est l'épaisseur de l'échantillon (mm).

Flexion à quatre points :

$$\sigma = \frac{3F(L_1 - L_2)}{bh^2}$$

Où L1 est la portée du support externe (mm) et L2 est la portée de chargement interne (mm).

5. Équipement de mesure

5.1 Machine d'essai

Capacité de charge : 0-50 kN , précision ±1%.

Vitesse de chargement : 0,5-5 mm/min, réglable.

Équipé d'un capteur de force et d'un capteur de déplacement avec une résolution <0,01 N et <0,01 mm.

5.2 Fixation

Dispositif de pliage à trois points : rayon du point d'appui 1-2 mm, rayon du point de chargement 1 mm.

Dispositif de pliage à quatre points : portée de support extérieure 20-40 mm, portée de charge intérieure 10-20 mm, rayon du point de support 1-2 mm.

Matériau de la pince : Acier trempé, dureté > HRC 60.

5.3 Équipement de préparation des échantillons

Machine de découpe : découpe de précision à basse vitesse, largeur de coupe < 0,5 mm, équipée d'un système de refroidissement.

Machine de meulage et de polissage : vitesse 300-600 tr/min, équipée de papier de verre diamanté 600#, 1200#, 2500# et d'un chiffon de polissage.

5.4 Contrôle environnemental

Température : 10°C à 35°C, 23±2°C recommandé.

Humidité : 30%-70%, 50±10% recommandé.

Aucune vibration, aucun environnement de gaz corrosif.

6. Préparation des échantillons

6.1 Exigences relatives à l'échantillon

Forme de l'échantillon : cuboïde, taille recommandée : 20 × 6,5 × 5,25 mm (longueur × largeur × hauteur), tolérance ± 0,1 mm.

La surface de l'échantillon doit être plane et exempte de fissures, de rayures ou de couches d'oxyde.

Les échantillons doivent être préparés conformément à la norme ISO 3847:2005.

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

6.2 Nombre d'échantillons

Le nombre d'échantillons dans chaque lot ne doit pas être inférieur à 10 afin de garantir la représentativité statistique.

Si l'écart type des résultats est > 50 MPa, le nombre d'échantillons doit être augmenté à 15.

6.3 Découpe et polissage des échantillons

Les échantillons ont été découpés à l'aide d'une machine de découpe de précision à basse vitesse avec une vitesse de coupe de $< 0,1$ mm/s et de l'éthanol ou de l'eau comme liquide de refroidissement.

Meulage grossier : utilisez du papier de verre diamanté 600# ou 1200# pour éliminer progressivement les marques de coupe.

Meulage fin : utiliser du papier de verre 2500#, rugosité de surface $R_a < 0,1 \mu\text{m}$.

Polissage : Utiliser un liquide de polissage à base d'oxyde d'aluminium de $0,25 \mu\text{m}$, rugosité de surface $R_a < 0,02 \mu\text{m}$.

6.4 Nettoyage des échantillons

Nettoyez la surface de l'échantillon avec de l'éthanol anhydre ou de l'acétone et effectuez un nettoyage par ultrasons pendant 5 minutes (fréquence 40 kHz).

Après séchage, conserver dans un dessiccateur pour éviter l'oxydation ou la contamination.

7 étapes de mesure

7.1 Étalonnage de l'équipement

Calibrer la précision de chargement de la machine d'essai, écart $\leq \pm 1\%$.

Calibrez le dispositif avec une erreur de centrage $< 0,05$ mm.

7.2 Conditions d'essai

Température ambiante : 10°C à 35°C , $23 \pm 2^\circ\text{C}$ recommandé.

Humidité relative : 30%-70%, $50 \pm 10\%$ recommandé.

Aucune vibration, aucun environnement de gaz corrosif.

7.3 Test de fonctionnement

Placez l'échantillon dans un dispositif de flexion à trois ou quatre points avec les points de support alignés avec les points de chargement.

Régalez la vitesse de chargement à $1 \pm 0,5$ mm/min.

Appliquer la charge jusqu'à ce que l'échantillon se brise et enregistrer la charge maximale F et le déplacement de fracture.

Répétez l'expérience 10 à 15 fois et enregistrez chaque ensemble de données.

7.4 Calcul des résultats

Calculez la résistance à la flexion σ de chaque échantillon selon la formule de la section 4.

Calculer la moyenne :

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

$$\bar{\sigma} = \frac{\sum \sigma_i}{n}$$

Où σ_i est la résistance à la flexion d'un seul échantillon et n est le nombre d'échantillons.

Calculer l'écart type :

$$s = \sqrt{\frac{\sum (\sigma_i - \bar{\sigma})^2}{n - 1}}$$

Jugement de qualification : écart moyen de résistance à la flexion $< \pm 5\%$, écart type < 50 MPa.

8 Évaluation des résultats de mesure

8.1 Plage de résistance à la flexion

La plage de résistance à la flexion du carbure cimenté dépend de la nuance :

YG6 (6% Co) : 2000-2500 MPa.

YG8 (8% Co) : 1800-2200 MPa.

YT15 (5% Co + TiC) : 1300-1600 MPa.

8.2 Évaluation des écarts

de 10 à 15 échantillons est $< \pm 5\%$ et l'écart type est < 50 MPa, sinon un nouveau test est nécessaire. Si la résistance à la flexion est inférieure aux exigences techniques, les raisons doivent être analysées (telles que les défauts de l'échantillon et la charge inégale).

8.3 Analyse des facteurs d'influence

Préparation des échantillons : une rugosité de surface $> 0,02 \mu\text{m}$ ou des fissures $> 0,05 \text{ mm}$ peuvent réduire la résistance à la flexion de 10 à 15 %.

Conditions de chargement : une vitesse de chargement $> 5 \text{ mm/min}$ ou un désalignement du dispositif $> 0,1 \text{ mm}$ peuvent entraîner un écart de 5 à 10 % dans les résultats.

Composition du matériau : une fluctuation de la teneur en Co $> \pm 0,5 \%$ ou une granulométrie WC $> 2 \mu\text{m}$ peut affecter l'uniformité de la résistance.

9 Rapport de test

Le rapport de test doit inclure les éléments suivants :

Informations sur l'échantillon : marque, numéro de lot, taille ($20 \times 6,5 \times 5,25 \text{ mm}$).

Conditions d'essai : modèle de machine d'essai, type de montage (trois ou quatre points), vitesse de chargement ($1 \pm 0,5 \text{ mm/min}$), température ambiante (10°C à 35°C), humidité (30%-70%).

Résultats des tests : résistance à la flexion, valeur moyenne, écart type et écart de chaque échantillon.

Conclusion de l'évaluation : si le projet répond aux exigences techniques.

Date du test et signature de l'opérateur.

Annexe A (Annexe informative) Valeurs de référence de la résistance à la flexion des carbures cimentés typiques

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

Marque	Teneur en Co (% en poids)	à la flexion (MPa)	Applications typiques
YG6	6	2000-2500	Trépans de forage minier
YG8	8	1800-2200	Outils de coupe
YT15	5	1300-1600	Outils de finition

Annexe B (Annexe informative) Exigences relatives à l'environnement de test

Température : 10°C à 35°C, 23±2°C recommandé.

Humidité : 30%-70%, 50±10% recommandé.

Aucune vibration, aucun environnement de gaz corrosif.

Planéité du banc d'essai : écart < 0,02 mm/m.

Résumer

La norme ISO 4489:2010 « Détermination de la résistance à la flexion du carbure cimenté » fournit une procédure normalisée internationale pour la détermination de la résistance à la flexion du carbure cimenté, par un essai de flexion en trois ou quatre points, afin de garantir l'exactitude et la comparabilité des résultats. La mise en œuvre de cette norme facilite l'évaluation des performances du carbure cimenté et apporte un soutien technique pour des domaines d'application tels que les outils coupants et les pièces résistantes à l'usure.

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

Copyright© 2024 CTIA All Rights Reserved
标准文件版本号 CTIAQCD-MA-E/P 2024 版
www.ctia.com.cn

电话/TEL: 0086 592 512 9696
CTIAQCD-MA-E/P 2018-2024V
sales@chinatungsten.com

appendice:

ISO 4499-3:2016 Carbure cimenté — Inspection de la microstructure

Partie 3 : Évaluation de la porosité, des inclusions, du carbone libre et de la phase η

1 Portée

Cette norme spécifie la méthode d'évaluation des défauts tels que les pores, les inclusions, le carbone libre et la phase η dans la microstructure du carbure cimenté. Elle utilise l'observation au microscope métallographique et un atlas standard pour la classification. Elle s'applique au carbure cimenté dont la phase dure principale est le carbure de tungstène (WC) et la phase de liaison au cobalt (Co), y compris le carbure cimenté associé à d'autres carbures (tels que le TaC, TiC, NbC, VC). Cette norme fait partie de la série de normes ISO 4499 et doit être utilisée conjointement avec la norme ISO 4499-1:2006.

2 Références normatives

Les articles des documents suivants deviennent les articles de la présente norme par référence. Pour les documents référencés avec une date, la version applicable est celle de cette date ; pour les documents référencés sans date, la dernière version (y compris tous les amendements) s'applique à la présente norme.

ISO 4499-1:2006 Carbure cimenté — Examen de la microstructure Partie 1 : Orientations générales
ISO 3847:2005 Méthodes de préparation des éprouvettes en carbure cimenté

3 Termes et définitions

Cette norme adopte la norme ISO 3850:2018 (dernière version) et les termes et définitions suivants :
Porosité : Pores ou espaces dans une microstructure, divisés en type A (diamètre $<10 \mu m$) et type B (diamètre $10-25 \mu m$).

Inclusions : Impuretés non métalliques (telles que les oxydes et les sulfures) présentes dans le carbure cimenté sous forme de particules.

Carbone libre : Carbone qui ne forme pas de composés avec les métaux et existe sous forme de graphite.

Phase η : Phase cassante formée en raison d'une teneur insuffisante en carbone, telle que W_3Co_3C ou Co_6W_6C .

Carbure cimenté : Matériau composite composé de carbure de tungstène (WC) comme phase dure principale et de cobalt (Co) comme phase de liaison par le biais d'un procédé de métallurgie des poudres.

4 principes d'évaluation

L'évaluation des défauts de la microstructure du carbure cimenté repose sur l'observation au microscope métallographique, combinée à un atlas standard (annexe A) pour classer le type, la taille, la quantité et la répartition des pores, des inclusions, du carbone libre et de la phase η . La méthode d'évaluation consiste à préparer des échantillons de haute qualité, à les observer en champ clair et

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

Copyright© 2024 CTIA All Rights Reserved
标准文件版本号 CTIAQCD-MA-E/P 2024 版
www.ctia.com.cn

电话/TEL: 0086 592 512 9696
CTIAQCD-MA-E/P 2018-2024V
sales@chinatungsten.com

en lumière polarisée, à enregistrer les caractéristiques des défauts et à les comparer à l'atlas standard pour déterminer la qualité du défaut.

5. Matériel d'évaluation

5.1 Microscope métallographique

Grossissement : 100×, 200×, 500×, 200× sont recommandés pour l'observation de routine.

Équipé de capacités de champ clair, de champ sombre et de lumière polarisée pour différencier les types de défauts.

Résolution : $< 0,5 \mu\text{m}$.

5.2 Équipement de préparation des échantillons

Machine de découpe : découpe de précision à basse vitesse, largeur de coupe $< 0,5 \text{ mm}$, équipée d'un système de refroidissement.

Machine de montage : montage par presse à chaud, température $< 150^\circ\text{C}$, pression 20-30 MPa.

Machine de meulage et de polissage : vitesse 300-600 tr/min, équipée de papier de verre diamanté 600#, 1200#, 2500# et d'un chiffon de polissage.

Nettoyeur à ultrasons : fréquence 40 kHz, utilisé pour nettoyer des échantillons.

5.3 Outils de mesure

Micromètre oculaire : valeur de graduation 0,01 mm, précision $\pm 0,001 \text{ mm}$.

Logiciel d'analyse d'image : prend en charge les statistiques de surface et de quantité de défauts, avec une précision de $\pm 0,1 \mu\text{m}$.

5.4 Contrôle environnemental

Température : 10°C à 35°C , $20 \pm 2^\circ\text{C}$ recommandé.

Humidité : 30%-70%, $50 \pm 10\%$ recommandé.

Aucune vibration, aucun environnement de gaz corrosif.

6. Préparation des échantillons

6.1 Exigences relatives à l'échantillon

Forme de l'échantillon : rectangulaire ou cylindrique, taille recommandée : $10 \times 10 \times 5 \text{ mm}$.

La surface de l'échantillon doit être plane et exempte de fissures, de rayures ou de couches d'oxyde.

Les échantillons doivent être préparés conformément à la norme ISO 3847:2005.

6.2 Nombre d'échantillons

Le nombre d'échantillons dans chaque lot ne doit pas être inférieur à 3 pour garantir la représentativité statistique.

Si l'écart de résultat est important (niveau > 1), le nombre d'échantillons doit être augmenté à 5.

6.3 Découpe et montage des échantillons

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

Les échantillons ont été découpés à l'aide d'une machine de découpe de précision à basse vitesse avec une vitesse de coupe de $< 0,1$ mm/s et de l'éthanol ou de l'eau comme liquide de refroidissement.

Montage par pressage à chaud, température $< 150^{\circ}\text{C}$, pression 20-30 MPa, temps 5-10 min.

6.4 Meulage et polissage des échantillons

Meulage grossier : utilisez du papier de verre diamanté 600# ou 1200# pour éliminer progressivement les marques de coupe.

Meulage fin : utiliser du papier de verre 2500#, rugosité de surface $R_a < 0,1 \mu\text{m}$.

Polissage : Utiliser une pâte à polir à l'oxyde d'aluminium de $0,25 \mu\text{m}$, une vitesse de polissage du chiffon de 300 tr/min, une rugosité de surface $R_a < 0,02 \mu\text{m}$.

6.5 Nettoyage et gravure des échantillons

Nettoyez la surface de l'échantillon avec de l'éthanol anhydre ou de l'acétone et effectuez un nettoyage par ultrasons pendant 5 minutes (fréquence 40 kHz).

Après séchage, utilisez le réactif de Murakami ($10 \text{ g K}_3[\text{Fe}(\text{CN})_6] + 10 \text{ g KOH} + 100 \text{ mL H}_2\text{O}$) pour graver doucement pendant 5 à 10 s afin d'améliorer le contraste des défauts.

Lavez et séchez à nouveau et rangez dans un sèche-linge.

7 étapes d'évaluation

7.1 Étalonnage de l'équipement

Calibrer le grossissement du microscope métallographique avec un écart de $\leq \pm 1\%$.

Calibrez le système d'éclairage pour garantir une source lumineuse uniforme sans différence de couleur.

7.2 Conditions d'essai

Température ambiante : 10°C à 35°C , $20 \pm 2^{\circ}\text{C}$ recommandé.

Humidité relative : 30%-70%, $50 \pm 10\%$ recommandé.

Aucune vibration, aucun environnement de gaz corrosif.

7.3 Observation microscopique

Placez l'échantillon sur la platine du microscope métallographique, ajustez la mise au point et sélectionnez un grossissement de $200\times$.

Observez la surface de l'échantillon dans au moins 5 champs de vision avec une zone de champ d'environ $0,5 \text{ mm}^2$.

Un champ clair a été utilisé pour observer les pores et les inclusions, et une lumière polarisée a été utilisée pour observer le carbone libre et la phase η .

7.4 Évaluation des défauts

Évaluation de la porosité :

Pores de type A ($< 10 \mu\text{m}$)

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

Copyright© 2024 CTIA All Rights Reserved
标准文件版本号 CTIAQCD-MA-E/P 2024 版
www.ctia.com.cn

电话/TEL: 0086 592 512 9696
CTIAQCD-MA-E/P 2018-2024V
sales@chinatungsten.com

A00 (sans pores), A02 (<10 pcs/mm²), A04 (10-20 pcs/mm²), A06 (20-30 pcs/mm²), A08 (>30 pcs/mm²).

Pores de type B (10-25 μm)

B00 (sans pores), B02 (<5 pcs/mm²), B04 (5-10 pcs/mm²), B06 (10-15 pcs/mm²), B08 (>15 pcs/mm²).

Évaluation de l'inclusion

I00 (sans inclusions), I02 (<5 pièces/mm², <10 μm), I04 (5-10 pièces/mm², 10-20 μm), I06 (>10 pièces/mm², >20 μm).

Évaluation gratuite du carbone

C00 (pas de carbone libre), C02 (<0,5%), C04 (0,5%-1,0%), C06 (1,0%-1,5%), C08 (>1,5%).

évaluation de la phase η

eta00 (pas de phase éta), eta02 (<0,5%), eta04 (0,5%-1,0%), eta06 (1,0%-1,5%), eta08 (>1,5%).

7.5 Calcul du résultat

Enregistrez les niveaux de défaut de 5 champs de vision, calculez la valeur moyenne et déterminez le niveau de défaut final de l'échantillon.

Évaluation de l'écart : L'écart de grade des 5 champs visuels est $\leq \pm 1$ niveau, sinon une nouvelle observation est nécessaire.

8 Évaluation des résultats de l'évaluation

8.1 Plage de degrés de défauts

Le niveau de défauts de carbure cémenté dépend de la nuance et de l'objectif :

YG6 (6% Co) : A02-B02-I02-C02-η02, adapté aux forets miniers.

YG8 (8% Co) : A04-B04-I02-C04-η02, adapté aux outils de coupe.

YT15 (5% Co + TiC) : A02-B02-I04-C02-η04, adapté aux outils de finition.

8.2 Évaluation des écarts

de 3 à 5 échantillons est $\leq \pm 1$ niveau, sinon un nouveau test est nécessaire.

Si le niveau de défaut dépasse les exigences techniques, la cause doit être analysée (par exemple, un processus de frittage anormal).

8.3 Analyse des facteurs d'influence

Porosité : Un vide de frittage insuffisant (<10 Pa) ou une vitesse de refroidissement excessive (>50°C/min) entraîne une porosité accrue (>A04).

Inclusions : Une faible pureté de la matière première (impuretés > 0,1 %) ou un mélange irrégulier entraîne une augmentation des inclusions (> I04).

Carbone libre : Une teneur excessive en carbone (> 0,2 %) ou une répartition inégale entraîne une augmentation du carbone libre (> C04).

Phase η : Une teneur en carbone insuffisante (< 0,1 %) ou une température de frittage élevée (> 1450 °C) conduit à la formation de la phase η (> η04).

9 Rapport de test

Le rapport de test doit inclure les éléments suivants :

Informations sur l'échantillon : marque, numéro de lot, taille.

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

Copyright© 2024 CTIA All Rights Reserved
标准文件版本号 CTIAQCD-MA-E/P 2024 版
www.ctia.com.cn

电话/TEL: 0086 592 512 9696
CTIAQCD-MA-E/P 2018-2024V
sales@chinatungsten.com

Conditions de test : modèle d'équipement, grossissement (200×), méthode d'observation, température ambiante (10°C à 35°C), humidité (30%-70%).

Résultats des tests : degré de défaut (A, B, I, C, η), valeur moyenne et écart pour chaque champ de vision.

Conclusion de l'évaluation : si le projet répond aux exigences techniques.

Date du test et signature de l'opérateur.

Annexe A (Annexe normative) Atlas standard des défauts

Pores de type A : A00-A08, le spectre montre la distribution des pores d'un diamètre <10 μ m .

Pores de type B : B00-B08, le spectre montre la distribution des pores d'un diamètre de 10-25 μ m .

Inclusions : I00-I06, le graphique montre la taille et la quantité des inclusions.

Carbone libre : C00-C08, le graphique montre le pourcentage de surface de carbone libre.

Phase η : η00-η08, le spectre montre le rapport de surface de la phase η.

Annexe B (Annexe informative) Valeurs de référence des niveaux typiques de défauts du carbure cimenté

Marque	Teneur en Co (% en poids)	Niveau de défaut	Applications typiques
YG6	6	A02-B02-I02-C02-η02	Trépans de forage minier
YG8	8	A04-B04-I02-C04-η02	Outils de coupe
YT15	5	A02-B02-I04-C02-η04	Outils de finition

Annexe C (Annexe informative) Exigences relatives à l'environnement de test

Température : 10°C à 35°C, 20±2°C recommandé.

Humidité : 30%-70%, 50±10% recommandé.

Aucune vibration, aucun environnement de gaz corrosif.

Planéité du banc d'essai : écart < 0,02 mm/m.

Résumer

La norme ISO 4499-3:2016 « Carbure cimenté – Examen de la microstructure, partie 3 : Évaluation de la porosité, des inclusions, du carbone libre et de la phase η » fournit une procédure internationale normalisée pour l'évaluation des défauts de microstructure du carbure cimenté, garantissant l'exactitude et la comparabilité des résultats grâce à l'observation au microscope métallographique et à la classification par atlas standard. La mise en œuvre de cette norme facilite le contrôle qualité du carbure cimenté et offre un soutien technique pour des applications hautes performances telles que les outils de coupe et les forets miniers.

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

appendice:

ISO 4499-2:2008 Carbure cimenté — Inspection de la microstructure

Partie 2 : Méthodes de détermination de la granulométrie

1 Portée

La présente norme spécifie la méthode de détermination de la granulométrie du carbure de tungstène (WC) dans les microstructures de carbure cimenté, à l'aide d'un microscope métallographique associé à une méthode de coupe linéaire ou à une méthode de coupe planifiée. La présente norme s'applique aux carbures cimentés dont la phase dure principale est le carbure de tungstène (WC) et la phase de liaison est le cobalt (Co), y compris les carbures cimentés contenant d'autres carbures (tels que le TaC, TiC, NbC). Cette norme ne s'applique pas aux carbures cimentés sans cobalt ni aux autres matériaux à base de carbures non cimentés.

2 Références normatives

Les articles des documents suivants deviennent les articles de la présente norme par référence. Pour les documents référencés avec une date, la version applicable est celle de cette date ; pour les documents référencés sans date, la dernière version (y compris tous les amendements) s'applique à la présente norme.

ISO 4499-1:2006 Carbure cimenté — Examen de la microstructure Partie 1 : Orientations générales

ISO 3847:2005 Méthodes de préparation des éprouvettes en carbure cimenté

ISO 3850:1983 Terminologie du carbure cimenté

3 Termes et définitions

Cette norme adopte la norme ISO 3850:1983 et les termes et définitions suivants :

Taille des grains : Diamètre moyen des grains de carbure de tungstène (WC) dans le carbure cimenté, généralement mesuré en microns (μm).

Méthode de section transversale linéaire : la taille moyenne des grains est calculée en mesurant le diamètre de la section transversale des grains de WC sur une ligne droite dans le champ de vision du microscope.

Méthode de section planifiée : la taille moyenne des grains est calculée en mesurant la section transversale de plusieurs grains de WC dans le champ de vision du microscope.

Carbure cimenté : Matériau composite composé de carbure de tungstène (WC) comme phase dure principale et de cobalt (Co) comme phase de liaison par le biais d'un procédé de métallurgie des poudres.

4. Principe de détermination

La détermination de la granulométrie du carbure WC repose sur l'observation au microscope métallographique, combinée à la méthode de la section linéaire ou à la méthode de la section planifiée. La méthode de la section linéaire mesure le diamètre transversal des grains sur une ligne droite dans le champ de vision du microscope et calcule la valeur moyenne statistiquement ; la méthode de la section planifiée mesure l'aire de la section transversale des grains et estime la granulométrie moyenne en combinaison avec un modèle géométrique. Ces deux méthodes

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

Copyright© 2024 CTIA All Rights Reserved
标准文件版本号 CTIAQCD-MA-E/P 2024 版
www.ctia.com.cn

电话/TEL: 0086 592 512 9696
CTIAQCD-MA-E/P 2018-2024V
sales@chinatungsten.com

nécessitent la préparation d'échantillons de haute qualité afin de garantir une surface plane et exempte de contamination, conformément aux directives générales de la norme ISO 4499-1:2006.

5. Équipement de mesure

5.1 Microscope métallographique

Grossissement : 200×, 500×, 1000×, 500× sont recommandés pour la détermination de la granulométrie.

Équipé de capacités de lumière polarisée et de contraste interférentiel différentiel (DIC) pour distinguer les limites des grains WC.

Résolution : $< 0,2 \mu\text{m}$.

5.2 Équipement de préparation des échantillons

Machine de découpe : découpe de précision à basse vitesse, largeur de coupe $< 0,5 \text{ mm}$, équipée d'un système de refroidissement.

Machine de montage : montage par presse à chaud, température $< 150^\circ\text{C}$, pression 20-30 MPa.

Machine de meulage et de polissage : vitesse 300-600 tr/min, équipée de papier de verre diamanté 600#, 1200#, 2500# et d'un chiffon de polissage.

Nettoyeur à ultrasons : fréquence 40 kHz, utilisé pour nettoyer des échantillons.

5.3 Outils de mesure

Micromètre oculaire de microscope : valeur de graduation 0,01 mm, précision $\pm 0,001 \text{ mm}$.

Logiciel d'analyse d'image : prend en charge la reconnaissance des limites de grains et le calcul de surface avec une précision de $\pm 0,1 \mu\text{m}$.

5.4 Contrôle environnemental

Température : 10°C à 35°C , $20 \pm 2^\circ\text{C}$ recommandé.

Humidité : 30%-70%, $50 \pm 10\%$ recommandé.

Aucune vibration, aucun environnement de gaz corrosif.

6. Préparation des échantillons

6.1 Exigences relatives à l'échantillon

Forme de l'échantillon : rectangulaire ou cylindrique, taille recommandée : $10 \times 10 \times 5 \text{ mm}$.

La surface de l'échantillon doit être plane et exempte de fissures, de rayures ou de couches d'oxyde.

Les échantillons doivent être préparés conformément à la norme ISO 3847:2005.

6.2 Nombre d'échantillons

Le nombre d'échantillons dans chaque lot ne doit pas être inférieur à 3 pour garantir la représentativité statistique.

Si l'écart de résultat est important ($> 0,5 \mu\text{m}$), le nombre d'échantillons doit être augmenté à 5.

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

6.3 Découpe et montage des échantillons

Les échantillons ont été découpés à l'aide d'une machine de découpe de précision à basse vitesse avec une largeur de coupe $< 0,5$ mm et de l'éthanol ou de l'eau comme liquide de refroidissement. Montage par pressage à chaud, température $< 150^{\circ}\text{C}$, pression 20-30 MPa, temps 5-10 min.

6.4 Meulage et polissage des échantillons

Meulage grossier : utilisez du papier de verre diamanté 600# ou 1200# pour éliminer progressivement les marques de coupe.

Meulage fin : utiliser du papier de verre 2500#, rugosité de surface $R_a < 0,1 \mu\text{m}$.

Polissage : Utiliser une pâte à polir à l'oxyde d'aluminium de $0,25 \mu\text{m}$, une vitesse de polissage du chiffon de 300 tr/min, une rugosité de surface $R_a < 0,02 \mu\text{m}$.

6.5 Nettoyage et gravure des échantillons

Nettoyez la surface de l'échantillon avec de l'éthanol anhydre ou de l'acétone et effectuez un nettoyage par ultrasons pendant 5 minutes (fréquence 40 kHz).

Après séchage, la surface a été légèrement gravée à l'aide du réactif de Murakumi ($10 \text{ g K}_3[\text{Fe}(\text{CN})_6] + 10 \text{ g KOH} + 100 \text{ mL H}_2\text{O}$) pendant 5 à 10 s pour améliorer le contraste des limites des grains de WC.

Laver et sécher, conserver dans un dessiccateur.

7 étapes de mesure

7.1 Étalonnage de l'équipement

Calibrer le grossissement du microscope métallographique avec un écart de $\leq \pm 1\%$.

Calibrez le micromètre oculaire ou le logiciel d'analyse d'image avec une précision de $\pm 0,1 \mu\text{m}$.

7.2 Conditions d'essai

Température ambiante : 10°C à 35°C , $20 \pm 2^{\circ}\text{C}$ recommandé.

Humidité relative : 30%-70%, $50 \pm 10\%$ recommandé.

Aucune vibration, aucun environnement de gaz corrosif.

7.3 Détermination de la granulométrie

Méthode de section linéaire :

Tracez 3 à 5 lignes droites parallèles dans le champ de vision du microscope avec une longueur totale $\geq 500 \mu\text{m}$.

Le diamètre transversal des grains de WC sur chaque ligne droite a été mesuré et 100 à 200 grains ont été comptés.

Calculer la taille moyenne des grains :

$$d = \frac{\sum d_i}{n}$$

Où d_i est le diamètre d'un seul grain et n est le nombre de grains.

Méthode de la section transversale planifiée :

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

Cinq zones ont été sélectionnées au hasard dans le champ de vision du microscope et les sections transversales de 100 à 200 grains ont été mesurées.

Utilisez un logiciel d'analyse d'image pour calculer la surface moyenne et la convertir en diamètre équivalent :

$$d = \sqrt{\frac{4A}{\pi}}$$

Parmi eux A A UN est la section transversale du grain.

La taille moyenne des grains de chaque échantillon a été enregistrée avec un écart de $\leq \pm 0,2 \mu m$.

7.4 Calcul des résultats

Prenez la granulométrie moyenne de 3 à 5 échantillons et calculez l'écart type :

$$\sigma = \sqrt{\frac{\sum (d_i - \bar{d})^2}{n - 1}}$$

Jugement de qualification : écart granulométrique moyen $\leq \pm 0,5 \mu m$, écart type $< 0,3 \mu m$.

8 Évaluation des résultats de mesure

8.1 Gamme de granulométrie

La gamme de granulométrie du carbure cimenté WC dépend de la nuance :

YG6 (6% Co) : 0,8-1,2 μm , adapté aux outils à haute ténacité.

YG8 (8% Co) : 1,0-1,5 μm , adapté à la découpe.

YT15 (5% Co + TiC) : 0,6-1,0 μm , adapté aux outils de finition.

8.2 Évaluation des écarts

de 3 à 5 échantillons est $\leq \pm 0,5 \mu m$, sinon un nouveau test est nécessaire.

Si la taille des grains dépasse les exigences techniques, les raisons doivent être analysées (telles que la taille inégale des particules de matière première, la température de frittage excessive).

8.3 Analyse des facteurs d'influence

Taille des particules de matière première : une taille de particule de matière première WC $> 2 \mu m$ peut entraîner une taille de grain plus grande ($> 1,5 \mu m$).

Température de frittage : Une température $> 1450^\circ C$ ou un temps de maintien $> 1 h$ peut entraîner une croissance des grains ($> 0,5 \mu m$).

Taux de refroidissement : Des taux de refroidissement $< 20^\circ C/min$ peuvent entraîner un grossissement des grains ($> 0,3 \mu m$).

Teneur en Co : une fluctuation de la teneur en Co $> \pm 0,5\%$ peut affecter l'uniformité de la croissance des grains.

Rapport de test 9

Le rapport de test doit inclure les éléments suivants :

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

Informations sur l'échantillon : marque, numéro de lot, taille.

Conditions d'essai : modèle d'équipement, grossissement (500×), méthode de mesure (linéaire ou planifiée), température ambiante (10°C à 35°C), humidité (30%-70%).

Résultats des tests : granulométrie, moyenne, écart type et variation pour chaque échantillon.

Conclusion de l'évaluation : si le projet répond aux exigences techniques.

Date du test et signature de l'opérateur.

Annexe A (Annexe informative) Valeurs de référence des tailles de grains typiques de carbure cémenté

Marque	Teneur en Co (% en poids)	Taille des grains (μm)	Applications typiques
YG6	6	0,8-1,2	Trépans de forage minier
YG8	8	1,0-1,5	Outils de coupe
YT15	5	0,6-1,0	Outils de finition

Annexe B (Annexe informative) Exigences relatives à l'environnement de test

Température : 10°C à 35°C, 20±2°C recommandé.

Humidité : 30%-70%, 50±10% recommandé.

Aucune vibration, aucun environnement de gaz corrosif.

Planéité du banc d'essai : écart < 0,02 mm/m.

Résumer

La norme ISO 4499-2:2008 « Carbure cémenté – Examen de la microstructure, Partie 2 : Méthode de détermination de la granulométrie » fournit une procédure normalisée internationale pour la détermination de la granulométrie des carbures cémentés WC et garantit l'exactitude et la comparabilité des résultats de mesure par la méthode de la section linéaire ou la méthode de la section planifiée. La mise en œuvre de cette norme contribue à optimiser les performances des matériaux en carbure cémenté et offre un soutien technique pour des applications hautes performances telles que les outils coupants et les forets miniers.

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

CTIA GROUP LTD 30 Years of Cemented Carbide Customization Experts

Core Advantages

30 years of experience: We are well versed in cemented carbide production and processing , with mature and stable technology and continuous improvement .

Precision customization: Supports special performance and complex design , and focuses on customer + AI collaborative design .

Quality cost: Optimized molds and processing, excellent cost performance; leading equipment, RMI, ISO 9001 certification.

Serving Customers

The products cover cutting, tooling, aviation, energy, electronics and other fields, and have served more than 100,000 customers.

Service Commitment

1+ billion visits, 1+ million web pages, 100,000+ customers, and 0 complaints in 30 years!

Contact Us

Email : sales@chinatungsten.com

Tel : +86 592 5129696

Official website : www.ctia.com.cn

WeChat : Follow "China Tungsten Online"



COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

Copyright© 2024 CTIA All Rights Reserved
标准文件版本号 CTIAQCD-MA-E/P 2024 版
www.ctia.com.cn

电话/TEL: 0086 592 512 9696
CTIAQCD-MA-E/P 2018-2024V
sales@chinatungsten.com

appendice:

ISO 4499-1:2006 Carbure cimenté — Inspection de la microstructure Partie 1 : Directives générales

1 Portée

Cette norme fournit des lignes directrices générales pour l'inspection de la microstructure du carbure cimenté, incluant les principes fondamentaux de la préparation des échantillons, les méthodes d'observation microscopique et l'évaluation des défauts. Elle s'applique au carbure cimenté dont la phase dure principale est le carbure de tungstène (WC) et la phase de liaison au cobalt (Co), y compris le carbure cimenté associé à d'autres carbures (tels que le TaC, TiC, NbC). Cette norme constitue la base de la série de normes ISO 4499, et les méthodes de mesure détaillées (telles que la granulométrie, l'évaluation des défauts) sont spécifiées dans les parties suivantes (telles que l'ISO 4499-2).

2 Références normatives

Les articles des documents suivants deviennent les articles de la présente norme par référence. Pour les documents référencés avec une date, la version applicable est celle de cette date ; pour les documents référencés sans date, la dernière version (y compris tous les amendements) s'applique à la présente norme.

ISO 3847:2005 Méthodes de préparation des éprouvettes en carbure cimenté

ISO 3850:1983 Terminologie du carbure cimenté

3 Termes et définitions

Cette norme adopte la norme ISO 3850:1983 et les termes et définitions suivants :

Microstructure : La microstructure du carbure cimenté sous observation grossie, y compris les grains de WC, la phase de liaison Co et les défauts.

Défauts : Caractéristiques anormales de la microstructure telles que pores, inclusions, carbone libre et phase éta.

Échantillon métallographique : Échantillon de carbure cimenté préparé pour observation microscopique par découpe, meulage, polissage et gravure.

Carbure cimenté : Matériau composite composé de carbure de tungstène (WC) comme phase dure principale et de cobalt (Co) comme phase de liaison par le biais d'un procédé de métallurgie des poudres.

4 Principe d'inspection

L'inspection de la microstructure du carbure cimenté repose sur l'observation par microscopie métallographique, associée à la préparation des échantillons et à une technologie de gravure appropriée, afin de révéler la distribution et la morphologie des grains de WC, des phases de Co et des défauts. Le processus d'inspection comprend la préparation des échantillons, l'observation microscopique et l'enregistrement des résultats, conformément à des procédures normalisées garantissant la reproductibilité et la comparabilité des résultats. Des méthodes spécifiques, telles que l'évaluation des défauts et la détermination de la taille des grains, sont détaillées dans des normes

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

Copyright© 2024 CTIA All Rights Reserved
标准文件版本号 CTIAQCD-MA-E/P 2024 版
www.ctia.com.cn

电话/TEL: 0086 592 512 9696
CTIAQCD-MA-E/P 2018-2024V
sales@chinatungsten.com

ultérieures.

5. Équipement d'inspection

5.1 Microscope métallographique

Grossissement : 50×, 100×, 200×, 500×, 200× sont recommandés pour l'observation de routine.

Équipé de capacités de champ clair, de champ sombre et de lumière polarisée pour distinguer différentes phases et défauts.

Résolution : $< 0,5 \mu m$.

5.2 Équipement de préparation des échantillons

Machine de découpe : découpe de précision à basse vitesse, largeur de coupe $< 0,5 mm$, équipée d'un système de refroidissement.

Machine de montage : montage par presse à chaud, température $< 150^{\circ}C$, pression 20-30 MPa.

Machine de meulage et de polissage : vitesse 300-600 tr/min, équipée de papier de verre diamanté 600#, 1200#, 2500# et d'un chiffon de polissage.

Nettoyeur à ultrasons : fréquence 40 kHz, utilisé pour nettoyer des échantillons.

5.3 Outils de mesure

Pied à coulisse : précision $\pm 0,02 mm$, utilisé pour mesurer la taille de l'échantillon.

Micromètre oculaire : valeur de graduation 0,01 mm, précision $\pm 0,001 mm$.

5.4 Contrôle environnemental

Température : $10^{\circ}C$ à $35^{\circ}C$, $20 \pm 2^{\circ}C$ recommandé.

Humidité : 30%-70%, $50 \pm 10\%$ recommandé.

Aucune vibration, aucun environnement de gaz corrosif.

6. Préparation des échantillons

6.1 Exigences relatives à l'échantillon

Forme de l'échantillon : rectangulaire ou cylindrique, taille recommandée : $10 \times 10 \times 5 mm$.

La surface de l'échantillon doit être plane et exempte de fissures, de rayures ou de couches d'oxyde.

Les échantillons doivent être préparés conformément à la norme ISO 3847:2005.

6.2 Nombre d'échantillons

Le nombre d'échantillons dans chaque lot ne doit pas être inférieur à 3 pour garantir la représentativité statistique.

Si les résultats présentent des écarts importants, le nombre d'échantillons doit être augmenté à 5.

6.3 Découpe et montage des échantillons

Les échantillons ont été découpés à l'aide d'un coupeur de précision à basse vitesse avec une largeur de coupe $< 0,5 mm$ et de l'éthanol ou de l'eau comme liquide de refroidissement.

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

Montage par pressage à chaud, température $<150^{\circ}\text{C}$, pression 20-30 MPa, temps 5-10 min.

6.4 Meulage et polissage des échantillons

Meulage grossier : utilisez du papier de verre diamanté 600# ou 1200# pour éliminer progressivement les marques de coupe.

Meulage fin : utiliser du papier de verre 2500#, rugosité de surface $R_a < 0,1 \mu\text{m}$.

Polissage : Utiliser une pâte à polir à l'oxyde d'aluminium de $0,25 \mu\text{m}$, une vitesse de polissage du chiffon de 300 tr/min, une rugosité de surface $R_a < 0,02 \mu\text{m}$.

6.5 Nettoyage et gravure des échantillons

Nettoyez la surface de l'échantillon avec de l'éthanol anhydre ou de l'acétone et effectuez un nettoyage par ultrasons pendant 5 minutes (fréquence 40 kHz).

Après séchage, la surface a été légèrement gravée à l'aide du réactif de Murakami ($10 \text{ g K}_3[\text{Fe}(\text{CN})_6] + 10 \text{ g KOH} + 100 \text{ mL H}_2\text{O}$) pendant 5 à 10 s pour améliorer les grains de WC et le contraste de phase.

Lavez et séchez à nouveau et rangez dans un sèche-linge.

7 étapes d'inspection

7.1 Étalonnage de l'équipement

Calibrer le grossissement du microscope métallographique avec un écart de $\leq \pm 1\%$.

Calibrez le système d'éclairage pour garantir une source lumineuse uniforme sans différence de couleur.

7.2 Conditions d'essai

Température ambiante : 10°C à 35°C , $20 \pm 2^{\circ}\text{C}$ recommandé.

Humidité relative : 30%-70%, $50 \pm 10\%$ recommandé.

Aucune vibration, aucun environnement de gaz corrosif.

7.3 Observation microscopique

Placez l'échantillon sur la platine du microscope métallographique, ajustez la mise au point et sélectionnez un grossissement de $200\times$.

Observez la surface de l'échantillon dans au moins 5 champs de vision avec une zone de champ d'environ $0,5 \text{ mm}^2$.

Un champ clair a été utilisé pour observer les grains de WC et la phase Co, et une lumière polarisée a été utilisée pour observer les défauts (tels que le carbone libre).

7.4 Enregistrement des résultats

Les caractéristiques microstructurales de chaque champ de vision, y compris la taille des grains de WC, la distribution de phase Co et les types de défauts, ont été enregistrées.

Prenez des micrographies (résolution $\geq 5 \text{ MP}$) pour une analyse et un rapport ultérieurs.

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

8 Évaluation des résultats des tests

8.1 Gamme de caractéristiques microstructurales

Granulométrie WC : 0,5-2,0 μm (selon la nuance).

Teneur en phase Co : 5%-15% (pourcentage en poids).

Défauts : Les niveaux de pores, d'inclusions, de carbone libre et de phase η doivent répondre aux exigences techniques (se référer à la norme ISO 4499-2).

8.2 Évaluation des écarts

L'écart de cohérence des caractéristiques microstructurales des 5 champs de vision était $<\pm 10\%$, sinon une nouvelle observation était nécessaire.

Si la microstructure dépasse les exigences techniques, les raisons doivent être analysées (telles que des paramètres de processus de frittage anormaux).

8.3 Analyse des facteurs d'influence

Préparation des échantillons : Un polissage insuffisant ($R_a > 0,1 \mu\text{m}$) ou une gravure excessive peuvent masquer les défauts.

Conditions d'observation : Une source lumineuse inégale ou un grossissement inapproprié peuvent entraîner un flou des limites des grains.

Composition du matériau : Les fluctuations de la teneur en Co $> \pm 0,5 \%$ ou la teneur en carbone non contrôlée peuvent affecter la microstructure.

9 Rapport de test

Le rapport de test doit inclure les éléments suivants :

Informations sur l'échantillon : marque, numéro de lot, taille.

Conditions de test : modèle d'équipement, grossissement (200 $\times$), méthode d'observation, température ambiante (10°C à 35°C), humidité (30%-70%).

Résultats des tests : caractérisation microstructurale, enregistrements photographiques et observations préliminaires des défauts.

Conclusion de l'évaluation : si le projet répond aux exigences techniques préliminaires.

Date du test et signature de l'opérateur.

Annexe A (Annexe informative) Valeurs de référence des caractéristiques de microstructure des carbures cémentés typiques

Marque	Teneur en Co (% en poids)	granulométrie du WC (μm)	Applications typiques
YG6	6	0,8-1,2	Trépans de forage minier
YG8	8	1,0-1,5	Outils de coupe
YT15	5	0,6-1,0	Outils de finition

Annexe B (Annexe informative) Exigences relatives à l'environnement de test

Température : 10°C à 35°C, 20 $\pm$ 2°C recommandé.

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

Humidité : 30%-70%, 50±10% recommandé.

Aucune vibration, aucun environnement de gaz corrosif.

Planéité du banc d'essai : écart < 0,02 mm/m.

Résumer

La norme ISO 4499-1:2006 « Carbure cimenté – Contrôle de la microstructure – Partie 1 : Lignes directrices générales » fournit un cadre international pour le contrôle de la microstructure du carbure cimenté, garantissant la reproductibilité et la comparabilité des résultats d'inspection grâce à des méthodes normalisées de préparation et d'observation des échantillons. La mise en œuvre de cette norme pose les bases de mesures spécifiques ultérieures (telles que la granulométrie et l'évaluation des défauts) et favorise l'optimisation des performances et le contrôle qualité des matériaux en carbure cimenté.

appendice:

ISO 3847:2005 Carbure cémenté Méthode de préparation des échantillons

1 Portée

Cette norme spécifie la méthode de préparation des éprouvettes en carbure cémenté, incluant la coupe, l'incrustation, la rectification, le polissage et le nettoyage. Elle est adaptée aux essais de performance ultérieurs (tels que la résistance à la flexion, la dureté) ou au contrôle de la microstructure. Elle s'applique aux carbures cémentés dont la phase dure principale est le carbure de tungstène (WC) et la phase de liaison au cobalt (Co), y compris les carbures cémentés contenant d'autres carbures (tels que le TaC, TiC, NbC). Cette norme ne s'applique pas aux carbures cémentés sans cobalt ni aux autres matériaux à base de carbures non cémentés.

2 Références normatives

Les articles des documents suivants deviennent les articles de la présente norme par référence. Pour les documents référencés avec une date, la version applicable est celle de cette date ; pour les documents référencés sans date, la dernière version (y compris tous les amendements) s'applique à la présente norme.

ISO 3850:1983 Terminologie du carbure cémenté

3 Termes et définitions

Cette norme adopte la norme ISO 3850:1983 et les termes et définitions suivants :

Échantillon d'essai : Échantillon de carbure cémenté préparé par découpe et usinage pour des tests de performance ou une observation microscopique.

Montage : Encastrer l'échantillon dans de la résine ou un matériau métallique pour faciliter le meulage, le polissage et l'observation ultérieurs.

Meulage et polissage : Éliminer les défauts de surface de l'échantillon par meulage et polissage pour obtenir une surface lisse.

Carbure cémenté : Matériau composite composé de carbure de tungstène (WC) comme phase dure principale et de cobalt (Co) comme phase de liaison par le biais d'un procédé de métallurgie des poudres.

4 Principe de préparation

La préparation des échantillons en carbure cémenté vise à obtenir une surface plane et intacte, adaptée aux essais ultérieurs ou à l'observation microscopique. Le processus de préparation comprend la découpe de l'échantillon pour obtenir la taille appropriée, le montage pour protéger les arêtes, le meulage et le polissage pour éliminer les défauts de surface, et le nettoyage pour éliminer les résidus. La méthode de préparation doit garantir que l'échantillon ne subit pas de modifications microstructurelles dues aux contraintes thermiques ou mécaniques.

5. Matériel de préparation

5.1 Équipement de coupe

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

Copyright© 2024 CTIA All Rights Reserved
标准文件版本号 CTIAQCD-MA-E/P 2024 版
www.ctia.com.cn

电话/TEL: 0086 592 512 9696
CTIAQCD-MA-E/P 2018-2024V
sales@chinatungsten.com

Machine de découpe de précision à basse vitesse : largeur de coupe < 0,5 mm, équipée d'un système de refroidissement (tel que l'eau ou l'éthanol).

Disque de coupe : granulométrie 120-240#, épaisseur 0,5-1,0 mm.

5.2 Équipement de montage

Machine de montage à chaud : température <150°C, pression 20-30 MPa, temps 5-10 min.

Matériaux d'incrustation en résine ou en métal : résines thermoplastiques (telles que les résines phénoliques) ou métaux à bas point de fusion (tels que les alliages étain-plomb).

5.3 Équipement de meulage et de polissage

Machine de meulage et de polissage : vitesse 300-600 tr/min, équipée de papier de verre diamanté 600#, 1200#, 2500# et d'un chiffon de polissage.

Liquide de polissage : suspension d'alumine 0,25 µm ou pâte de polissage diamantée 1 µm .

5.4 Matériel de nettoyage

Nettoyeur à ultrasons : fréquence 40 kHz, puissance 100-200 W.

Agent nettoyant : éthanol anhydre ou acétone.

5.5 Contrôle environnemental

Température : 10°C à 35°C, 20±2°C recommandé.

Humidité : 30%-70%, 50±10% recommandé.

Aucune vibration, aucun environnement de gaz corrosif.

6. Préparation des échantillons

6.1 Exigences relatives à l'échantillon

Forme de l'échantillon : rectangulaire ou cylindrique, la taille recommandée est de 10 × 10 × 5 mm ou 10 mm de diamètre et 5 mm de hauteur.

Il ne doit pas y avoir de fissures, de brûlures ou de couches d'oxyde évidentes sur la surface de l'échantillon.

Les éprouvettes doivent être représentatives de l'homogénéité du lot de matériaux.

6.2 Nombre d'échantillons

Le nombre d'échantillons dans chaque lot ne doit pas être inférieur à 3 pour garantir la représentativité statistique.

Si les tests ultérieurs nécessitent une précision plus élevée, le nombre doit être augmenté à 5.

6.3 Découpe d'échantillons

Les échantillons ont été découpés à l'aide d'une machine de découpe de précision à basse vitesse avec une vitesse de coupe de < 0,1 mm/s et de l'éthanol ou de l'eau comme liquide de refroidissement.

La direction de coupe est perpendiculaire à la surface de stratification du matériau et la largeur de coupe est < 0,5 mm.

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

6.4 Montage des échantillons

L'échantillon est placé dans un moule d'incrustation et une résine thermoplastique ou un métal à bas point de fusion est ajouté.

Montage par presse à chaud, température $<150^{\circ}\text{C}$, pression 20-30 MPa, temps 5-10 min, s'assurer que le bord de l'échantillon est intact.

6.5 Meulage et polissage des échantillons

Meulage grossier : utilisez du papier de verre diamanté 600# ou 1200# pour éliminer progressivement les marques de coupe et appliquez une pression de 5 à 10 N.

Meulage fin : utiliser du papier de verre 2500#, rugosité de surface $R_a < 0,1 \mu\text{m}$.

Polissage : Utiliser un liquide de polissage à l'alumine de $0,25 \mu\text{m}$, une vitesse de chiffon de polissage de 300 tr/min, une rugosité de surface $R_a < 0,02 \mu\text{m}$, un temps de polissage de 5 à 10 min.

6.6 Nettoyage des échantillons

Nettoyez la surface de l'échantillon avec de l'éthanol anhydre ou de l'acétone et effectuez un nettoyage par ultrasons pendant 5 minutes (fréquence 40 kHz).

Après séchage, conserver dans un dessiccateur pour éviter l'oxydation ou la contamination.

7 étapes de préparation

7.1 Étalonnage de l'équipement

Calibrer la vitesse de la machine de découpe, l'écart est $\leq \pm 5\%$.

Calibrer la vitesse et la pression de la machine de meulage et de polissage, avec un écart de $\leq \pm 2\%$.

Vérifier la température et la pression de la machine de montage, écart $\leq \pm 1^{\circ}\text{C}$ et $\pm 1 \text{ MPa}$.

7.2 Conditions d'essai

Température ambiante : 10°C à 35°C , $20 \pm 2^{\circ}\text{C}$ recommandé.

Humidité relative : 30%-70%, $50 \pm 10\%$ recommandé.

Aucune vibration, aucun environnement de gaz corrosif.

7.3 Processus d'exploitation

Effectuez la découpe, le montage, le meulage, le polissage et le nettoyage de l'échantillon dans l'ordre des sections 6.3 à 6.6.

Après chaque étape, vérifiez la qualité de la surface de l'échantillon et enregistrez toute anomalie (telle que fissures, brûlures).

7.4 Vérification des résultats

Rugosité de surface : $R_a < 0,02 \mu\text{m}$.

Planéité de surface : Écart $< 0,01 \text{ mm}$.

Aucune rayure ni contamination visible.

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

8 Évaluation des résultats de la préparation

8.1 Gamme de qualité de surface

Il ne doit pas y avoir de fissures, de brûlures ou de couches d'oxyde visibles sur la surface de l'échantillon.

Rugosité $R_a < 0,02 \mu m$, écart de planéité $< 0,01 mm$.

8.2 Évaluation des écarts

de 3 à 5 échantillons est $\pm 10 \%$, sinon une nouvelle préparation est nécessaire.

Si la qualité de surface ne répond pas aux exigences, les raisons doivent être analysées (par exemple, la vitesse de coupe est trop élevée, le temps de polissage est insuffisant).

8.3 Analyse des facteurs d'influence

Découpe : Des vitesses de coupe $> 0,1 mm/s$ ou un refroidissement insuffisant peuvent provoquer des fissures ($> 0,05 mm$).

Montage : Des températures $> 150^\circ C$ ou des pressions $< 20 MPa$ peuvent provoquer une déformation de l'échantillon ($> 0,1 mm$).

Meulage et polissage : Un papier de verre avec un grain trop grossier ($< 600\#$) ou un temps de polissage $< 5 min$ peut entraîner une rugosité de surface ($R_a > 0,1 \mu m$).

Nettoyage : Des résidus de produit de nettoyage ou un séchage insuffisant peuvent provoquer une contamination (particules visibles $> 0,01 mm$).

9. Préparer le rapport

Le rapport doit inclure les éléments suivants :

Informations sur l'échantillon : marque, numéro de lot, taille initiale.

Conditions de préparation : modèle d'équipement, vitesse de coupe ($< 0,1 mm/s$), température de montage ($< 150^\circ C$), paramètres de meulage et de polissage, température ambiante ($10^\circ C$ à $35^\circ C$), humidité (30%-70%).

Résultats de préparation : rugosité de surface ($R_a < 0,02 \mu m$), écart de planéité ($< 0,01 mm$), enregistrements anormaux.

Conclusion de l'évaluation : si le produit répond aux exigences des tests ultérieurs.

Date de préparation et signature de l'opérateur.

Annexe A (Annexe informative) Valeurs de référence des paramètres typiques de préparation des échantillons de carbure cimenté

Marque	Teneur en Co (% en poids)	Taille de l'échantillon (mm)	Rugosité de surface ($R_a, \mu m$)	Applications typiques
YG6	6	10×10×5	$< 0,02$	Trépan de forage minier
YG8	8	10×10×5	$< 0,02$	Outils de coupe

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

Marque	Teneur en Co (% en poids)	Taille de l'échantillon (mm)	Rugosité de surface (Ra, μ m)	Applications typiques
YT15	5	10×10×5	<0,02	Outils de finition

Annexe B (Annexe informative) Exigences relatives à l'environnement de test

Température : 10°C à 35°C, 20±2°C recommandé.

Humidité : 30%-70%, 50±10% recommandé.

Aucune vibration, aucun environnement de gaz corrosif.

Planéité du banc d'essai : écart < 0,02 mm/m.

Résumer

La norme ISO 3847:2005 « Méthodes de préparation d'échantillons de carbure cimenté » fournit une procédure internationale normalisée pour la préparation d'échantillons de carbure cimenté. Grâce à des étapes normalisées de coupe, de montage, de meulage, de polissage et de nettoyage, elle garantit que la qualité de surface de l'échantillon répond aux exigences des essais de performance ou de l'inspection de la microstructure ultérieurs. La mise en œuvre de cette norme fournit une base technique fiable pour l'évaluation des performances et le contrôle qualité des matériaux en carbure cimenté.

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

Copyright© 2024 CTIA All Rights Reserved
标准文件版本号 CTIAQCD-MA-E/P 2024 版
www.ctia.com.cn

电话/TEL: 0086 592 512 9696
CTIAQCD-MA-E/P 2018-2024V
sales@chinatungsten.com

appendice:

ISO 3850:2018 Carbure cimenté
le terme

1 Portée

Cette norme définit les termes et définitions du carbure cimenté et des matériaux apparentés, couvrant la composition, le procédé de préparation, la microstructure, les essais de performance et les domaines d'application. Elle s'applique au carbure cimenté dont la phase dure principale est le carbure de tungstène (WC) et la phase de liaison est le cobalt (Co), le nickel (Ni) ou le fer (Fe), y compris le carbure cimenté associé à d'autres carbures (tels que le TaC, TiC, NbC, VC). Cette norme constitue la base des séries de normes sur le carbure cimenté (telles que ISO 4499 et ISO 3847) et convient au commerce international, à la recherche et aux applications industrielles.

2 Références normatives

Cette norme ne fait pas directement référence à d'autres normes, mais dans le cadre de la série de normalisation sur le carbure cimenté, elle est liée aux normes suivantes :

ISO 4499-1:2006 Carbure cimenté — Examen de la microstructure Partie 1 : Orientations générales

ISO 3847:2005 Méthodes de préparation des éprouvettes en carbure cimenté

Remarque : Les dernières versions des documents référencés (y compris tous les amendements) s'appliquent à cette norme.

3 Termes et définitions

Les termes suivants relatifs au carbure sont définis dans la norme ISO 3850:2018, classés par catégorie :

3.1 Composition du matériau

3.1.1 Phase dure

Carbure de tungstène (WC) : Le carbure, principal composant dur du carbure cimenté, a la formule chimique WC et présente une dureté et une résistance à l'usure élevées.

D'autres carbures, tels que le carbure de tantale (TaC), le carbure de titane (TiC), le carbure de niobium (NbC) et le carbure de vanadium (VC), sont utilisés comme composants auxiliaires de la phase dure.

3.1.2 Phase de liaison

Cobalt (Co) : un métal de liaison courant dans le carbure cimenté, avec une teneur en phase généralement de 5 à 15 % (en poids), offrant ténacité et force de liaison.

Nickel (Ni) : En tant que métal remplaçant la phase de liaison, il convient aux environnements résistants à la corrosion.

Fer (Fe) : Composant de phase de liaison présent en petites quantités et souvent utilisé comme élément d'alliage.

3.1.3 Impuretés

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

Carbone libre : Carbone qui ne forme pas de composés avec les métaux et existe sous forme de graphite.

Phase η : Phase cassante formée en raison d'une teneur insuffisante en carbone, telle que W_3Co_3C ou Co_6W_6C .

3.2 Processus de préparation

3.2.1 Métallurgie des poudres

Le processus de fabrication du carbure cémenté est préparé en mélangeant, en pressant et en frittant des poudres.

3.2.2 Frittage

Le processus de combinaison de particules de poudre à haute température ($1300^{\circ}C$ - $1500^{\circ}C$) peut être divisé en frittage sous vide et frittage à basse température.

3.2.3 Pressage isostatique à chaud (HIP)

Procédé de traitement ultérieur pour éliminer la porosité à haute température et pression.

3.3 Microstructure

3.3.1 Grain

Les particules microscopiques de WC dans le carbure cémenté ont généralement une taille de 0,5 à $5,0\ \mu m$.

3.3.2 Porosité

Les pores ou vides de la microstructure sont divisés en type A ($<10\ \mu m$) et type B (10 - $25\ \mu m$).

3.3.3 Inclusions

Les impuretés non métalliques (telles que les oxydes et les sulfures) existent sous forme de particules.

3.4 Tests de performance

3.4.1 Résistance à la flexion

La contrainte maximale que l'échantillon peut supporter lors d'un essai de flexion en trois ou quatre points, en MPa.

3.4.2 Dureté

La résistance à l'intrusion du carbure cémenté est généralement exprimée en dureté Rockwell (HRA) ou en dureté Vickers (HV).

3.4.3 Ténacité à la rupture

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

La capacité d'un matériau à résister à la croissance des fissures est exprimée par le facteur d'intensité de contrainte KIC K_{IC} , avec l'unité de $MPa \cdot m^{1/2}$.

3.5 Domaines d'application

3.5.1 Outils de coupe

Le carbure est utilisé dans les outils de coupe pour l'usinage du métal, du bois ou des matériaux composites.

3.5.2 Pièces résistantes à l'usure

Par exemple, les forets miniers et les matrices d'emboutissage s'appuient sur la résistance élevée à l'usure du carbure cimenté.

3.5.3 Applications militaires

Le carbure cimenté est utilisé pour fabriquer des noyaux perforants ou des matériaux de blindage.

4 principes d'utilisation de la terminologie

La terminologie doit être cohérente dans les normes ou documents techniques pertinents pour éviter toute ambiguïté.

Les symboles et les unités suivent le Système international d'unités (SI), tels que μm (micromètre), MPa (mégapascal).

Les termes standards doivent être utilisés en premier lors de la définition des termes. En l'absence de définitions correspondantes, les pratiques du secteur peuvent servir de référence.

5 exemples de terminologie

Voici quelques exemples de la manière dont certains de ces termes sont utilisés dans la pratique :
Taille des grains : La taille des grains WC du carbure cimenté de qualité YG6 est de 0,8 à 1,2 μm .
Température de frittage : La température de frittage typique du carbure cimenté de qualité YT15 est de 1400°C à 1450°C.
Résistance à la flexion : La résistance à la flexion du carbure cimenté de qualité YG8 varie de 1800 à 2200 MPa.

Annexe A (Annexe informative) Valeurs de référence d'application de la terminologie typique du carbure cimenté

Marque	Teneur en Co (% en poids)	Taille des grains (μm)	à la flexion (MPa)	Applications typiques
YG6	6	0,8-1,2	2000-2500	Trépans de forage minier
YG8	8	1,0-1,5	1800-2200	Outils de coupe
YT15	5	0,6-1,0	1300-1600	Outils de finition

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

Annexe B (Annexe informative) Historique du développement de la terminologie

La norme ISO 3850 a été publiée pour la première fois en 1983 et définit principalement les termes de base du carbure cimenté.

La révision de 2018 a mis à jour la définition de la phase de liaison (ajout de Ni et Fe), ajouté des termes d'application militaire et optimisé la description du processus de préparation.

Résumer

La norme ISO 3850:2018 « Terminologie du carbure cimenté » fournit une base terminologique unifiée pour la normalisation internationale dans le domaine du carbure cimenté, couvrant la composition du matériau, le procédé de préparation, la microstructure, les essais de performance et les domaines d'application. La mise en œuvre de cette norme favorise les échanges techniques et le contrôle qualité au sein de l'industrie mondiale du carbure cimenté, et pose les bases linguistiques et conceptuelles pour l'application des normes ultérieures (telles que l'ISO 4499 et l'ISO 3847).

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

Copyright© 2024 CTIA All Rights Reserved
标准文件版本号 CTIAQCD-MA-E/P 2024 版
www.ctia.com.cn

电话/TEL: 0086 592 512 9696
CTIAQCD-MA-E/P 2018-2024V
sales@chinatungsten.com

appendice:

ISO 3850:2018 Métaux durs
- Vocabulaire

1 Portée

La présente Norme internationale définit les termes et définitions relatifs aux métaux-durs et à leurs matériaux associés, couvrant la composition des matériaux, les procédés de fabrication, la microstructure, les essais de performance et les domaines d'application. Elle s'applique aux métaux-durs dont la phase dure primaire est le carbure de tungstène (WC) et la phase liante est le cobalt (Co), le nickel (Ni) ou le fer (Fe), y compris ceux contenant des carbures supplémentaires (par exemple , TaC). TiC , NbC , VC). Il sert de vocabulaire fondamental pour la série de normes de normalisation des métaux durs (par exemple , ISO 4499, ISO 3847) et est destiné à être utilisé dans le commerce international, la recherche et les applications industrielles.

2 Références normatives

Cette norme ne fait pas directement référence à d'autres normes, mais fait partie de la série de normalisation des métaux durs et est liée aux éléments suivants :

ISO 4499-1:2006 Métaux-durs — Détermination métallographique de la microstructure — Partie 1 : Orientations générales

ISO 3847:2005 Métaux-durs — Détermination des méthodes de préparation des échantillons

Remarque : Les dernières versions des documents référencés (y compris les modifications) s'appliquent.

3 Termes et définitions

Les termes et définitions suivants sont définis conformément à la norme ISO 3850:2018, classés par domaine :

3.1 Composition du matériau

3.1.1 Phase dure

Carbure de tungstène (WC)

Le principal composant dur des métaux durs , de formule chimique WC, caractérisé par une dureté et une résistance à l'usure élevées.

Autres carbures

Tels que le carbure de tantale (TaC), le carbure de titane (TiC), le carbure de niobium (NbC) et le carbure de vanadium (VC), utilisés comme phases dures auxiliaires.

3.1.2 Phase liante

Cobalt (Co)

Le liant métallique commun dans les métaux durs , généralement compris entre 5 % et 15 % en

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

poids, assure la ténacité et la force de liaison.

Nickel (Ni)

Un liant métallique alternatif, adapté aux environnements résistants à la corrosion.

Fer (Fe)

Un composant mineur de la phase liante, souvent utilisé comme élément d'alliage.

3.1.3 Impuretés

Carbone libre

Carbone non combiné avec des métaux, existant sous forme de graphite.

Phase Êta (phase η)

Une phase cassante formée en raison d'une carence en carbone, telle que W_3Co_3C ou Co_6W_6C .

3.2 Procédés de fabrication

3.2.1 Métallurgie des poudres

Le processus de fabrication des métaux durs, impliquant le mélange, le pressage et le frittage de poudres.

3.2.2 Frittage

Procédé de liaison de particules de poudre à haute température ($1300^{\circ}C$ à $1500^{\circ}C$), y compris le frittage sous vide et le frittage à basse température.

3.2.3 Pressage isostatique à chaud (HIP)

Un procédé de post-traitement pour éliminer la porosité sous haute température et pression.

3.3 Microstructure

3.3.1 Grain

Particules microscopiques de WC dans les métaux durs, dont la taille varie généralement de 0,5 à $5,0\ \mu m$.

3.3.2 Porosité

Pores ou vides de gaz dans la microstructure, classés comme type A ($<10\ \mu m$) et type B ($10-25\ \mu m$).

3.3.3 Inclusions

Impuretés non métalliques (par exemple, oxydes, sulfures) présentes sous forme de particules dans les métaux durs.

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

3.4 Tests de performance

3.4.1 Résistance à la rupture transversale

La contrainte maximale qu'un échantillon supporte lors d'un essai de flexion en trois ou quatre points, mesurée en MPa.

3.4.2 Dureté

La résistance des métaux durs à l'indentation, généralement mesurée à l'aide des échelles Rockwell A (HRA) ou Vickers (HV).

3.4.3 Ténacité à la rupture :

La capacité d'un matériau à résister à la propagation des fissures, exprimée par le facteur d'intensité de contrainte (K_{IC}), en unités de $MPa \cdot m^{1/2}$.

3.5 Domaines d'application

3.5.1 Outils de coupe

Métaux durs utilisés pour l'usinage des métaux, du bois ou des composites.

3.5.2 Pièces d'usure

Tels que les forets miniers et les matrices d'emboutissage, s'appuyant sur la haute résistance à l'usure des métaux durs.

3.5.3 Applications militaires

Métaux durs utilisés dans les projectiles perforants ou les matériaux de blindage.

4 principes d'utilisation de la terminologie

Les termes doivent être utilisés de manière cohérente dans les normes ou documents techniques pertinents afin d'éviter toute ambiguïté.

Les symboles et les unités doivent être conformes au Système international d'unités (SI), par exemple μm (micromètres), MPa (mégapascals).

Lorsqu'il n'existe pas de définition standard, les conventions de l'industrie peuvent être référencées.

5 exemples d'utilisation de la terminologie

Voici des exemples de termes dans des applications pratiques :

Taille des grains

La taille des grains de WC dans le métal dur YG6 varie de 0,8 à 1,2 μm .

Température de frittage

métal dur YT15 varie de 1400°C à 1450°C.

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

Résistance à la rupture transversale
métal dur YG8 varie de 1800 à 2200 MPa.

Annexe A (informative) Terminologie typique des métaux durs Valeurs de référence d'application

Grade	Teneur en Co (% en poids)	Taille des grains (μm)	Résistance à la rupture transversale (MPa)	Application typique
YG6	6	0,8-1,2	2000-2500	Trépans de forage minier
YG8	8	1,0-1,5	1800-2200	Outils de coupe
YT15	5	0,6-1,0	1300-1600	Outils de coupe de précision

Annexe B (informative) Développement historique de la terminologie

La norme ISO 3850 a été publiée pour la première fois en 1983, définissant principalement la terminologie de base des métaux durs .

La révision de 2018 a mis à jour les définitions de phase liante (ajout de Ni et Fe), introduit des termes d'application militaire et affiné les descriptions des processus de fabrication.

Résumé

La norme ISO 3850:2018 « Métaux durs — Vocabulaire » fournit une base terminologique normalisée pour l' industrie des métaux durs , couvrant la composition des matériaux, les procédés de fabrication, la microstructure, les essais de performance et les domaines d'application. Sa mise en œuvre facilite la communication technique et le contrôle qualité à l'échelle mondiale, et appuie les normes ultérieures telles que l'ISO 4499 et l'ISO 3847.

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

Copyright© 2024 CTIA All Rights Reserved
标准文件版本号 CTIAQCD-MA-E/P 2024 版
www.ctia.com.cn

电话/TEL: 0086 592 512 9696
CTIAQCD-MA-E/P 2018-2024V
sales@chinatungsten.com

appendice:

GB/T 4295-2008 Carbone cimenté

Méthode d'évaluation des défauts de microstructure

1 Portée

La présente norme spécifie la méthode d'évaluation des défauts microstructuraux du carbure cimenté, incluant les procédures d'observation et d'évaluation des défauts tels que les pores, les inclusions, le carbone libre et la phase η , par observation au microscope métallographique. Elle s'applique au carbure cimenté dont la phase dure principale est le carbure de tungstène (WC) et la phase de liaison au cobalt (Co), y compris le carbure cimenté associé à d'autres carbures (tels que le TaC, TiC, VC). Cette norme ne s'applique pas au carbure cimenté sans cobalt ni aux autres matériaux composites.

2 Références normatives

Les articles des documents suivants deviennent des articles de la présente norme par référence. Pour les documents référencés datés, seule la version référencée est applicable. Pour les documents référencés non datés, la dernière version (y compris tous les amendements) s'applique à la présente norme.

GB/T 3847-2005 Méthode de préparation d'échantillons en carbure cimenté

GB/T 3850-1983 Terminologie du carbure cimenté

GB/T 3489-2005 Méthode d'évaluation de la structure métallographique du carbure cimenté

GB/T 3848-2001 Méthode de détermination de la masse volumique du carbure cimenté

3 Termes et définitions

Cette norme adopte la norme GB/T 3850-1983 et les termes et définitions suivants :

Porosité : Pores ou vides dans la microstructure du carbure cimenté, divisés en type A (diamètre $<10 \mu m$) et type B (diamètre $10-25 \mu m$).

Inclusions : Impuretés non métalliques (telles que les oxydes et les sulfures) dans le carbure cimenté, généralement sous forme de particules.

Carbone libre : Carbone dans le carbure cimenté qui ne forme pas de composés avec les métaux, existe sous forme de graphite, nom de code C.

Phase η : Phase cassante formée dans le carbure cimenté en raison d'une teneur en carbone insuffisante (comme W_3Co_3C), nom de code η .

Carbure cimenté : Matériau composite composé de carbure de tungstène (WC) comme phase dure principale et de cobalt (Co) comme phase de liaison par procédé de métallurgie des poudres.

4 principes d'évaluation

L'évaluation des défauts de la microstructure du carbure cimenté s'effectue par observation au microscope métallographique. Les types et degrés de pores, d'inclusions, de carbone libre et de phase η sont évalués par la préparation des échantillons, le polissage, l'observation microscopique et la comparaison avec des atlas standard. L'évaluation et la classification des défauts reposent sur leur taille, leur nombre et leur répartition. L'atlas standard (annexe A) est utilisé à des fins de comparaison pour décrire quantitativement ou qualitativement le niveau de défaut.

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

5. Matériel d'évaluation

5.1 Microscope métallographique

Grossissement : 100×, 200×, 500×, 200× sont recommandés pour l'observation de routine.

Équipé d'une fonction de lumière polarisée pour distinguer le carbone libre et la phase η .

Résolution : $< 0,5 \mu m$.

5.2 Équipement de préparation des échantillons

Machine de découpe : découpe de précision à basse vitesse, largeur d'incision $< 0,5 mm$.

Machine de montage : montage par presse à chaud, température $< 150^{\circ}C$, pour éviter les modifications structurelles.

Machine de meulage et de polissage : vitesse 300-600 tr/min, équipée de papier de verre diamanté et de chiffon de polissage.

Nettoyeur à ultrasons : fréquence 40 kHz, utilisé pour nettoyer des échantillons.

5.3 Équipement auxiliaire

Pied à coulisse : précision $\pm 0,02 mm$, utilisé pour mesurer la taille de l'échantillon.

Testeur de microdureté : en option, utilisé pour aider à l'analyse de la dureté de la phase η ($> HRC 70$).

5.4 Contrôle environnemental

Température : $10^{\circ}C$ à $35^{\circ}C$, $20 \pm 5^{\circ}C$ recommandé.

Humidité : 30%-80%, $50 \pm 10\%$ recommandé.

Aucune vibration, aucun environnement de gaz corrosif.

6. Préparation des échantillons

6.1 Exigences relatives à l'échantillon

Forme de l'échantillon : rectangulaire ou cylindrique, taille recommandée : $10 \times 10 \times 5 mm$.

La surface de l'échantillon doit être plane et exempte de fissures ou de couche d'oxyde.

Les échantillons doivent être conformes aux exigences de préparation de la norme GB/T 3847-2005.

6.2 Nombre d'échantillons

Le nombre d'échantillons dans chaque lot ne doit pas être inférieur à 3 pour garantir la représentativité statistique.

Si l'écart de résultat est important (niveau > 1), le nombre d'échantillons doit être augmenté à 5.

6.3 Découpe et montage des échantillons

Les échantillons ont été découpés à l'aide d'une machine de découpe de précision à basse vitesse avec une largeur de coupe de $< 0,5 mm$ et de l'eau comme liquide de refroidissement.

Montage par pressage à chaud, température $< 150^{\circ}C$, pression 20-30 MPa, temps 5-10 min.

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

6.4 Meulage et polissage des échantillons

Meulage grossier : utilisez du papier de verre diamanté 120#, 240#, 600# pour éliminer progressivement les marques de coupe.

Meulage fin : utiliser du papier de verre 1000#, 1500#, rugosité de surface $Ra < 0,2 \mu m$.

Polissage : Utiliser une pâte à polir diamantée de $1 \mu m$, une vitesse de chiffon de polissage de 300 tr/min, une rugosité de surface $Ra < 0,05 \mu m$.

6.5 Nettoyage des échantillons

Nettoyez la surface de l'échantillon avec de l'éthanol anhydre ou de l'acétone et effectuez un nettoyage par ultrasons pendant 5 minutes (fréquence 40 kHz).

Après séchage, conserver dans un dessiccateur pour éviter l'oxydation ou la contamination.

7 étapes d'évaluation

7.1 Étalonnage de l'équipement

Calibrer le grossissement du microscope métallographique avec un écart de $\leq \pm 1\%$.

Vérifiez le système d'éclairage pour vous assurer que la source lumineuse est uniforme et sans différence de couleur.

7.2 Conditions d'essai

Température ambiante : $10^{\circ}C$ à $35^{\circ}C$, $20 \pm 5^{\circ}C$ recommandé.

Humidité relative : 30%-80%, $50 \pm 10\%$ recommandé.

Aucune vibration, aucun environnement de gaz corrosif.

7.3 Observation microscopique

Placez l'échantillon sur la platine du microscope métallographique, ajustez la mise au point et sélectionnez un grossissement de $200\times$.

Observez la surface de l'échantillon dans au moins 5 champs de vision avec une zone de champ d'environ $0,5 mm^2$.

Enregistrez la distribution et la morphologie des pores, des inclusions, du carbone libre et de la phase δ et comparez-les avec le spectre standard (annexe A).

7.4 Évaluation des défauts

Évaluation de la porosité :

Pores de type A ($< 10 \mu m$) :

Évaluation par quantité : A00 (sans pores), A02 (< 10 pcs/ mm^2), A04 (10-20 pcs/ mm^2), A06 (20-30 pcs/ mm^2), A08 (> 30 pcs/ mm^2).

Pores de type B (10-25 μm) :

Évaluation par quantité : B00 (sans pores), B02 (< 5 pcs/ mm^2), B04 (5-10 pcs/ mm^2), B06 (10-15 pcs/ mm^2), B08 (> 15 pcs/ mm^2).

Évaluation de l'inclusion :

Classés par numéro et taille : I00 (sans inclusions), I02 (< 5 pièces/ mm^2 , $< 10 \mu m$), I04 (5-10 pièces/ mm^2 , 10-20 μm), I06 (> 10 pièces/ mm^2 , $> 20 \mu m$).

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

Bilan Carbone Gratuit :

Classés par pourcentage de surface : C00 (pas de carbone libre), C02 (< 0,5 %), C04 (0,5 % - 1,0 %), C06 (1,0 % - 1,5 %) et C08 (> 1,5 %).

Évaluation de la phase η :

Évaluation par pourcentage de surface : η 00 (pas de phase η), η 02 (< 0,5 %), η 04 (0,5 % - 1,0 %), η 06 (1,0 % - 1,5 %) et η 08 (> 1,5 %).

7.5 Enregistrement des résultats

Enregistrez la note de défaut pour chaque champ de vision et calculez la moyenne pour déterminer la note de défaut finale de l'échantillon.

Évaluation de l'écart : L'écart de grade des 5 champs visuels est $\leq \pm 1$ niveau, sinon une réobservation est nécessaire.

8 Évaluation des résultats de l'évaluation

8.1 Plage de niveaux de défauts

Le niveau de défauts microstructuraux dans le carbure cimenté dépend de la nuance et de l'objectif :

YG6 (6% Co) : A02-B02-I02-C02- η 02, adapté aux forêts miniers.

YG8 (8% Co) : A04-B04-I02-C04- η 02, adapté aux outils de coupe.

YT15 (5% Co + TiC) : A02-B02-I04-C02- η 04, adapté aux outils de finition.

8.2 Évaluation des écarts

les 5 champs de vision sont de grade $\leq \pm 1$, sinon un nouveau test est nécessaire.

Si le niveau de défaut dépasse les exigences techniques, la cause doit être analysée (par exemple, la température de frittage est trop élevée, la teneur en carbone est hors de contrôle).

8.3 Analyse des facteurs d'influence

Porosité : Un vide de frittage insuffisant (<10 Pa) entraînera une porosité accrue (>A04).

Inclusions : Une faible pureté de la matière première (impuretés > 0,1%) entraînera une augmentation des inclusions (> I04).

Carbone libre : Une teneur en carbone trop élevée (> 0,2 %) entraînera une augmentation du carbone libre (> C04).

Phase η : Une teneur en carbone insuffisante (< 0,1 %) ou une vitesse de refroidissement excessive (> 50 °C/min) entraînera la formation de la phase η (> η 04).

9 Rapport de test

Le rapport de test doit inclure les éléments suivants :

Informations sur l'échantillon : marque, numéro de lot, taille.

Conditions de test : modèle d'équipement, grossissement (200×), température ambiante (10°C à 35°C), humidité (30%-80%).

Résultats des tests : évaluation des défauts (A, B, I, C, η), moyenne et écart pour chaque champ de vision.

Conclusion de l'évaluation : si le projet répond aux exigences techniques.

Date du test et signature de l'opérateur.

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

Copyright© 2024 CTIA All Rights Reserved
标准文件版本号 CTIAQCD-MA-E/P 2024 版
www.ctia.com.cn

电话/TEL: 0086 592 512 9696
CTIAQCD-MA-E/P 2018-2024V
sales@chinatungsten.com

Annexe A (Annexe normative) Atlas standard des défauts

Pores de type A : A00-A08, le spectre montre la distribution des pores d'un diamètre $<10 \mu m$.
Pores de type B : B00-B08, le spectre montre la distribution des pores d'un diamètre de $10-25 \mu m$.
Inclusions : I00-I06, le graphique montre la taille et la quantité des inclusions.
Carbone libre : C00-C08, le graphique montre le pourcentage de surface de carbone libre.
Phase η : $\eta 00-\eta 08$, le spectre montre le rapport de surface de la phase η .

Annexe B (Annexe informative) Valeurs de référence des niveaux typiques de défauts du carbure cimenté

Marque	Teneur en Co (% en poids)	Niveau de défaut	Applications typiques
YG6	6	A02-B02-I02-C02- $\eta 02$	Trépan de forage minier
YG8	8	A04-B04-I02-C04- $\eta 02$	Outils de coupe
YT15	5	A02-B02-I04-C02- $\eta 04$	Outils de finition

Annexe C (Annexe informative) Exigences relatives à l'environnement de test

Température : $10^{\circ}C$ à $35^{\circ}C$, $20 \pm 5^{\circ}C$ recommandé.
Humidité : 30%-80%, $50 \pm 10\%$ recommandé.
Aucune vibration, aucun environnement de gaz corrosif.
Planéité du banc d'essai : écart $< 0,02 \text{ mm/m}$.

Résumer

La norme GB/T 4295-2008 « Méthode d'évaluation des défauts de microstructure du carbure cimenté » fournit une procédure normalisée d'évaluation des défauts de microstructure du carbure cimenté et garantit la précision et la répétabilité des résultats d'évaluation par observation au microscope métallographique. La mise en œuvre de cette norme facilite le contrôle qualité des matériaux en carbure cimenté et offre un support technique fiable pour des applications hautes performances telles que les outils de coupe et les forets miniers.

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

Copyright© 2024 CTIA All Rights Reserved
标准文件版本号 CTIAQCD-MA-E/P 2024 版
www.ctia.com.cn

电话/TEL: 0086 592 512 9696
CTIAQCD-MA-E/P 2018-2024V
sales@chinatungsten.com

appendice:

GB/T 5249-2008

carbure cimenté

Spécifications générales pour la préparation des échantillons

1 Portée

La présente norme spécifie les spécifications générales pour la préparation d'échantillons de carbure cimenté, y compris les étapes de prélèvement, de découpe, d'incrustation, de meulage, de polissage, de nettoyage, etc. Elle s'applique à la préparation d'échantillons pour les essais de performance du carbure cimenté (dureté, masse volumique, résistance à la flexion, ténacité à la rupture, microstructure, etc.). Elle s'applique au carbure cimenté dont la phase dure principale est le carbure de tungstène (WC) et la phase de liaison au cobalt (Co), ainsi qu'au carbure cimenté contenant d'autres carbures (tels que le TaC, TiC, VC). Cette norme ne s'applique pas à la préparation d'échantillons de carbure cimenté revêtu ou de carbure cimenté après renforcement de surface.

2 Références normatives

Les articles des documents suivants deviennent les articles de la présente norme par référence. Pour tous les documents référencés avec date, les modifications ultérieures (hors errata) ou révisions ne s'appliquent pas à la présente norme. Pour tous les documents référencés sans date, la dernière version s'applique à la présente norme.

GB/T 18376-2001 Méthode d'essai de performance du carbure cimenté

GB/T 3849-2008 Méthode d'essai pour la dureté Vickers du carbure cimenté

GB/T 7997-2010 Méthode d'essai de la ténacité à la rupture du carbure cimenté

GB/T 3488-2008 Méthode d'essai de la microstructure du carbure cimenté

ISO 3878:1983 Carbure cimenté — Spécifications pour la préparation des éprouvettes

3 Termes et définitions

Cette norme utilise les termes et définitions suivants :

Carbure cimenté : Matériau composite composé de carbure de tungstène (WC) comme phase dure principale et de cobalt (Co) comme phase de liaison par le biais d'un procédé de métallurgie des poudres.

Échantillon d'essai : une partie représentative prélevée sur un produit ou une ébauche en carbure cimenté pour des tests de performance.

Meulage et polissage : Grâce au meulage et au polissage mécaniques, la surface de l'échantillon est amenée à atteindre un état miroir.

Rugosité de surface (Ra) : Écart moyen arithmétique de la rugosité de surface de l'échantillon, en μm .

4. Prélèvement d'échantillons

4.1 Principes d'échantillonnage

Les échantillons doivent être prélevés sur des parties représentatives des produits ou des ébauches en carbure cimenté pour garantir que les résultats des tests de performance sont statistiquement

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

significatifs.

L'emplacement d'échantillonnage doit éviter les bords et les zones défectueuses (telles que les fissures et les zones de concentration de pores).

4.2 Quantité d'échantillonnage

Le nombre d'échantillons prélevés pour chaque lot de produits ou d'ébauches ne doit pas être inférieur à 3 et pour les tests de performance (tels que la dureté, la ténacité à la rupture) ne doit pas être inférieur à 5.

Si la quantité du lot est < 10 pièces, le taux d'échantillonnage est de 30 % à 50 % ; si la quantité du lot est > 100 pièces, le taux d'échantillonnage est de 5 % à 10 %.

4.3 Marquage d'échantillonnage

Les échantillons doivent être marqués du numéro de lot, du numéro de marque (par exemple, YG8, YT15) et du lieu d'échantillonnage. Ce marquage ne doit pas affecter la zone de traitement ou d'essai ultérieure.

5. Découpe d'échantillons

5.1 Exigences en matière d'équipement

Machine de découpe : équipée d'une lame de scie diamantée, vitesse de coupe < 500 tr/min.

Liquide de refroidissement : eau distillée ou liquide de refroidissement spécial, température < 40°C.

5.2 Étapes de coupe

Fixez le produit en carbure ou le brut sur l'établi de la machine de découpe.

Couper avec une lame de scie diamantée à basse vitesse (<500 tr/min) et appliquer une légère pression (<50 N).

Maintenir un refroidissement et éviter toute surchauffe locale (température < 60°C).

5.3 Résultats de coupe

La taille de l'échantillon doit répondre aux exigences des tests ultérieurs, tels que :

Essai de dureté : 5×5×2 mm (±0,1 mm).

Essai de ténacité à la rupture : 20×4×2 mm (±0,02 mm).

Contrôle de la microstructure : 10×10×5 mm (±0,1 mm).

La surface coupée doit être lisse, sans fissures ni marques de brûlure évidentes.

6. Montage des échantillons

6.1 Champ d'application

Le montage est nécessaire lorsque l'échantillon est petit (< 5 mm) ou a une forme irrégulière.

Le montage améliore la manipulation des échantillons et la stabilité de la surface d'essai.

6.2 Exigences en matière d'équipement

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

Machine de montage à chaud : plage de température 150-180°C, pression 20-30 MPa.

Résine de montage : Résine thermodurcissable ou résine époxy, dureté > HV 100.

6.3 Étapes de montage

Placez l'échantillon dans un moule de montage et ajoutez de la poudre de résine ou de la résine liquide.

Réglez la température à 150-180°C, la pression à 20-30 MPa et chauffez pendant 5 à 10 min.

Laisser refroidir naturellement à température ambiante (< 40 °C) et retirer l'échantillon monté.

6.4 Résultats de la mosaïque

La surface de l'échantillon monté est plane, la résine est fermement liée à l'échantillon et il n'y a pas de bulles ni de fissures.

La surface d'essai de l'échantillon est exposée, avec une zone > 5×5 mm.

7. Broyage et polissage des échantillons

7.1 Exigences en matière d'équipement

Machine à poncer et à polir : vitesse 200-300 tr/min.

Papier de verre : grain 400#-2000# (papier de verre SiC).

Disque de polissage : équipé de liquide de polissage diamanté (granulométrie 0,5-1 μ m) .

7.2 Étapes de meulage et de polissage

mouture grossière :

Utilisez du papier de verre 400#-800# pour éliminer progressivement les marques de coupe à une vitesse de 200 tr/min et appliquez une légère pression (<20 N).

Après chaque changement de papier de verre, rincez l'échantillon à l'eau pour éliminer les résidus de meulage.

broyage fin :

Utilisez du papier de verre 1000#-2000#, augmentez progressivement le grain, faites tourner à 200 tr/min et appliquez une légère pression (<10 N).

Assurez-vous qu'il n'y a pas de rayures évidentes sur la surface et que la rugosité est réduite à $R_a < 0,2 \mu$ m .

polissage:

Un liquide de polissage diamanté (taille des particules 0,5 μ m) a été utilisé, la vitesse du disque de polissage était de 300 tr/min et une légère pression (< 5 N) a été appliquée.

Poli jusqu'à finition miroir, rugosité de surface $R_a < 0,05 \mu$ m (inspection au microscope).

7.3 Résultats de meulage et de polissage

La surface de l'échantillon est plane et lisse, sans rayures, fissures ou marques de brûlure.

La rugosité de surface $R_a < 0,05 \mu$ m répond aux exigences de test de dureté, de ténacité à la rupture, de microstructure, etc.

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

8. Nettoyage des échantillons

8.1 Méthodes de nettoyage

Faites tremper l'échantillon dans de l'éthanol anhydre ou de l'acétone pendant 1 à 2 minutes pour éliminer l'huile, la poussière et les résidus de polissage.

Utilisez un nettoyeur à ultrasons (fréquence 40 kHz, puissance 100 W) pendant 2 à 3 minutes pour améliorer l'effet de nettoyage.

Utilisez de l'air comprimé ou du papier filtre pour essuyer la surface de l'échantillon afin d'éviter les taches d'eau.

8.2 Résultats du nettoyage

Il n'y a aucune saleté ou résidu visible sur la surface de l'échantillon et il est adapté aux tests ultérieurs.

9. Inspection des échantillons

9.1 Inspection d'apparence

Vérifiez si la surface de l'échantillon est plane et exempte de fissures, de pores ou de marques de brûlure.

Mesurez la taille de l'échantillon et l'écart doit répondre aux exigences du tableau 1.

Tableau 1 Exigences relatives à l'écart de taille des échantillons

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

appendice:

GB/T 5249-2008

carbure cimenté

Spécifications générales pour la préparation des échantillons

1 Portée

Cette norme spécifie les spécifications générales pour la préparation d'échantillons pour les essais de performance du carbure cimenté, y compris les exigences pour l'échantillonnage, la coupe, l'incrustation, le meulage, le polissage, le nettoyage, le marquage, etc. Cette norme est applicable aux carbures cimentés avec du carbure de tungstène (WC) comme phase dure principale et du cobalt (Co) comme phase de liaison, ainsi qu'aux carbures cimentés avec d'autres carbures (tels que TaC, TiC, VC). Cette norme s'applique à la préparation d'éprouvettes pour des essais de performance tels que la dureté, la masse volumique, la résistance à la flexion, la ténacité à la rupture et la microstructure, mais pas à la préparation d'éprouvettes pour carbures cimentés revêtus ou carbures cimentés après renforcement de surface.

2 Références normatives

Les articles des documents suivants deviennent les articles de la présente norme par référence. Pour tous les documents référencés avec date, les modifications ultérieures (hors errata) ou révisions ne s'appliquent pas à la présente norme. Pour tous les documents référencés sans date, la dernière version s'applique à la présente norme.

GB/T 3849-2008 Méthode d'essai pour la dureté Vickers du carbure cimenté

GB/T 3488-2008 Méthode d'essai de la microstructure du carbure cimenté

GB/T 7997-2010 Méthode d'essai de la ténacité à la rupture du carbure cimenté

GB/T 3850-2008 Méthode de détermination de la résistance à la flexion du carbure cimenté

GB/T 3848-2008 Méthode de détermination de la masse volumique du carbure cimenté

ISO 4489:1978 Méthodes de préparation et d'essai des éprouvettes en carbure cimenté

3 Termes et définitions

Cette norme utilise les termes et définitions suivants :

Carbure cimenté : Matériau composite composé de carbure de tungstène (WC) comme phase dure principale et de cobalt (Co) comme phase de liaison par le biais d'un procédé de métallurgie des poudres.

Échantillon d'essai : Échantillon prélevé sur des matériaux ou des produits en carbure cimenté pour des tests de performance.

Échantillonnage : Processus d'extraction d'échantillons de matériaux ou de produits en carbure cimenté.

Meulage et polissage : Processus consistant à amener la surface de l'échantillon à atteindre la rugosité spécifiée grâce au meulage et au polissage mécaniques.

Rugosité de surface (Ra) : La rugosité moyenne arithmétique de la surface de l'échantillon, en μm .

4 Principe de préparation des échantillons

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

Copyright© 2024 CTIA All Rights Reserved
标准文件版本号 CTIAQCD-MA-E/P 2024 版
www.ctia.com.cn

电话/TEL: 0086 592 512 9696
CTIAQCD-MA-E/P 2018-2024V
sales@chinatungsten.com

La préparation des échantillons en carbure cimenté vise à garantir une surface plane et exempte de défauts grâce à l'échantillonnage, la découpe, le montage, le meulage, le polissage et le nettoyage, entre autres, afin de répondre aux exigences de précision des essais de performance. La préparation des échantillons doit éviter les défauts de fabrication (fissures, surchauffe et modifications structurelles) et garantir que la taille, la rugosité et la géométrie de l'échantillon sont conformes aux normes d'essai correspondantes.

5. Équipement de préparation des échantillons

5.1 Équipement de coupe

Machine de découpe : équipée d'une lame de scie diamantée, vitesse de coupe 300-500 tr/min.

Liquide de refroidissement : Eau ou liquide de refroidissement à base d'eau, température contrôlée <60°C, éviter la surchauffe.

5.2 Équipement de montage

Machine de montage à chaud : plage de température 150-200°C, pression 20-30 MPa.

Matériau de montage : résine phénolique ou résine époxy, résistant à la température >150°C.

5.3 Équipement de meulage et de polissage

Machine à poncer et à polir : vitesse 200-500 tr/min.

Papier de verre : grain 400#-2000#.

Disque de polissage : feutre ou flanelle, vitesse 300-400 tr/min.

Agent de polissage : Liquide de polissage diamanté, granulométrie 0,5-1 μm .

5.4 Matériel de nettoyage

Nettoyeur à ultrasons : fréquence 40 kHz, puissance 100-200 W.

Liquide de nettoyage : éthanol anhydre ou acétone.

5.5 Outils de mesure

Pied à coulisse : précision $\pm 0,02\text{ mm}$.

Micromètre numérique : précision $\pm 0,001\text{ mm}$.

Testeur de rugosité de surface : précision $\pm 0,01\text{ }\mu\text{m}$.

5.6 Contrôle environnemental

Température : $20\pm 5^\circ\text{C}$.

Humidité : $50\pm 10\%$.

Aucune vibration, aucun environnement de gaz corrosif.

6 étapes de préparation des échantillons

6.1 Échantillonnage

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

Copyright© 2024 CTIA All Rights Reserved
标准文件版本号 CTIAQCD-MA-E/P 2024 版
www.ctia.com.cn

电话/TEL: 0086 592 512 9696
CTIAQCD-MA-E/P 2018-2024V
sales@chinatungsten.com

6.1.1 Lieu d'échantillonnage

L'échantillonnage doit être représentatif des propriétés globales du matériau, en évitant les zones proches des bords, les défauts de surface ou les zones affectées par la chaleur.

Pour les barres, les plaques ou les pièces, le lieu d'échantillonnage doit être conforme aux normes d'essai correspondantes :

Essai de dureté : > 1 mm de la surface.

Inspection de la microstructure : $> 0,5$ mm de la surface.

Essai de résistance à la flexion : > 2 mm du bord.

6.1.2 Quantité d'échantillonnage

Le nombre d'échantillons prélevés pour chaque lot ne doit pas être inférieur à 5 afin de garantir la représentativité statistique.

Si l'écart du résultat du test est important ($> 5\%$), le nombre d'échantillons doit être augmenté à 10.

6.1.3 Méthode d'échantillonnage

Utiliser une lame de scie diamantée pour la coupe, de l'eau comme liquide de refroidissement, une vitesse de coupe de 300 à 500 tr/min, une température < 60 °C pour éviter une surchauffe entraînant des modifications tissulaires.

La surface de coupe doit être plane avec un écart de verticalité $< 0,05$ mm.

6.2 Taille de l'échantillon

Déterminer la taille de l'échantillon en fonction de l'élément de test :

Essai de dureté (GB/T 3849-2008) : surface $> 5 \times 5$ mm, épaisseur > 2 mm.

Essai de résistance à la flexion (GB/T 3850-2008) : $20 \times 6,5 \times 5,25$ mm ($\pm 0,05$ mm).

Essai de ténacité à la rupture (GB/T 7997-2010) : $20 \times 4 \times 2$ mm ($\pm 0,02$ mm).

Contrôle de la microstructure (GB/T 3488-2008) : $10 \times 10 \times 5$ mm ($\pm 0,1$ mm).

Les écarts dimensionnels doivent être conformes aux exigences des normes d'essai pertinentes.

6.3 Mosaïque (facultatif)

6.3.1 Champ d'application

Les échantillons de petite taille ($< 5 \times 5 \times 2$ mm) ou de forme irrégulière doivent être montés.

6.3.2 Étapes de montage

Utilisez un monte-à-chaud et choisissez une résine phénolique ou une résine époxy.

La température de montage est de 150 à 180 °C, la pression est de 20 à 30 MPa et le temps de maintien est de 5 à 10 minutes.

Après refroidissement, l'échantillon est étroitement lié au matériau de montage sans bulles ni fissures.

6.4 Meulage et polissage

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

6.4.1 Broyage grossier

Utilisez du papier de verre de 400# à 1200# pour éliminer progressivement les marques de coupe. La vitesse est de 200 tr/min, le temps de meulage de chaque niveau de papier de verre est de 1 à 2 min et la direction est tournée à 90° pour assurer des marques de meulage uniformes. Après un meulage grossier, la surface est lisse sans rayures évidentes (inspection au microscope, grossissement 50×).

6.4.2 Broyage fin

Utilisez du papier de verre 1500#-2000#, vitesse 200 tr/min, temps de meulage 1 à 2 min. La rugosité de surface après meulage fin est $Ra < 0,2 \mu m$ (mesurée par un rugosimètre de surface).

6.4.3 Polissage

Utiliser un liquide de polissage diamanté (taille des particules 0,5-1 μm), vitesse du disque de polissage 300-400 tr/min, temps de polissage 3-5 min. Après polissage, la rugosité de surface $Ra < 0,05 \mu m$, semblable à un miroir et sans rayures (inspection au microscope, grossissement 100×).

6.5 Nettoyage

L'échantillon a été placé dans un nettoyeur à ultrasons et nettoyé avec de l'éthanol anhydre pendant 3 à 5 minutes à une fréquence de 40 kHz et une puissance de 100 W. Après le nettoyage, séchez avec de l'azote sec pour vous assurer qu'il n'y a aucun résidu sur la surface.

6.6 Exemple de marquage

Marquez le numéro de lot, le numéro de marque (tel que YG8, YT15) et les éléments de test sur la zone non testée de l'échantillon.

Méthode de marquage : Gravure laser ou marquage à l'encre, le marquage doit être clair et ne doit pas affecter la zone de test.

6.7 Inspection des échantillons

Vérifiez la surface de l'échantillon : pas de fissures, de rayures, de couches d'oxyde ou de contamination.

Vérifiez la taille : utilisez un pied à coulisse ou un micromètre pour mesurer et vérifiez que l'écart répond aux exigences de la norme de test.

Contrôle de la rugosité de surface : $Ra < 0,05 \mu m$ (contrôle de la microstructure) ou $Ra < 0,1 \mu m$ (test de dureté).

7. Évaluation de la qualité de la préparation des échantillons

7.1 Qualité de surface

La surface de l'échantillon doit être semblable à un miroir, sans rayures, fissures ou défauts de traitement (inspection au microscope, grossissement 100×).

Rugosité de surface :

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

Contrôle de la microstructure : $Ra < 0,05 \mu m$.

Essai de dureté : $Ra < 0,1 \mu m$.

Essai de résistance à la flexion ou à la rupture : $Ra < 0,2 \mu m$.

7.2 Précision dimensionnelle

L'écart de taille de l'échantillon doit être conforme aux normes d'essai correspondantes :

Essai de résistance à la flexion : $\pm 0,05 mm$.

Essai de ténacité à la rupture : $\pm 0,02 mm$.

Contrôle de la microstructure : $\pm 0,1 mm$.

7.3 Impact organisationnel

Aucune modification structurelle (telle que le grossissement des grains ou les fissures dues à une surchauffe) ne doit être introduite pendant le processus de préparation des échantillons.

Des températures de coupe $> 60^\circ C$ peuvent entraîner des écarts de taille de grain WC $> \pm 0,2 \mu m$ (inspection au microscope, grossissement 1000 $\times$).

7.4 Traitement non conforme

Si la qualité de surface, la taille ou la rugosité de l'échantillon ne sont pas satisfaisantes, l'échantillon doit être préparé à nouveau.

Si des fissures ou des modifications structurelles sont détectées, la cause doit être analysée (par exemple, une vitesse de coupe trop rapide) et rééchantillonnée.

8 Stockage d'échantillons

L'échantillon doit être testé immédiatement après sa préparation pour éviter une exposition prolongée à l'air ($> 24 h$).

Si un stockage est nécessaire, l'échantillon doit être placé dans un dessiccateur à $20 \pm 5^\circ C$ et humidité $< 30\%$, et emballé dans du papier antirouille.

La durée de stockage ne doit pas dépasser 1 mois pour éviter l'oxydation ou la contamination.

9 Rapport d'inspection

Le rapport d'inspection doit inclure les éléments suivants :

Informations sur l'échantillon : marque, numéro de lot, taille.

Conditions de préparation : vitesse de coupe (300-500 tr/min), température de montage ($150-180^\circ C$), granulométrie du liquide de polissage ($0,5-1 \mu m$).

Résultats de préparation : rugosité de surface (Ra), écart dimensionnel, évaluation de la qualité de surface.

Conclusion de l'évaluation : si le produit répond aux exigences du test.

Date de préparation et signature de l'opérateur.

Annexe A (Annexe informative) Exigences pour la préparation d'échantillons typiques de carbure cémenté

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

Éléments de test	Taille de l'échantillon (mm)	Rugosité de surface (Ra, μ m)	Écart dimensionnel (mm)	Applications typiques
Test de dureté	>5×5×2	<0,1	±0,1	Outils de coupe
Essai de résistance à la flexion	20×6,5×5,25	<0,2	±0,05	Trépans de forage minier
Essai de ténacité à la rupture	20×4×2	<0,2	±0,02	Moule
Inspection de la microstructure	10×10×5	<0,05	±0,1	Contrôle de qualité

Annexe B (Annexe informative) Exigences environnementales pour la préparation des échantillons

Température : 20±5°C.
Humidité : 50±10%.
Aucune vibration, aucun environnement de gaz corrosif.
Planéité de l'établi : écart < 0,02 mm/m.

Annexe C (Annexe informative) Problèmes courants et solutions pour la préparation des échantillons

question	raison	Solution de contournement
Rayures superficielles	La taille des particules du liquide de polissage est trop grande (> 1 μ m)	Utiliser un liquide de polissage avec une granulométrie de 0,5 μ m
Échantillon surchauffé (> 60 °C)	La vitesse de coupe est trop rapide (> 500 tr/min)	Réduire la vitesse de coupe à 300 tr/min
La rugosité de surface ne répond pas à la norme	Temps de polissage insuffisant (<3 min)	Prolongez le temps de polissage à 5 minutes
Fissuration du bord de l'échantillon	Découpe sans liquide de refroidissement	Utiliser un liquide de refroidissement à base d'eau à des températures < 60 °C

Résumer

La norme GB/T 5249-2008 « Spécification générale pour la préparation des échantillons de carbure cimenté » fournit une procédure normalisée pour la préparation des échantillons destinés aux essais de performance du carbure cimenté. Grâce à des étapes normalisées d'échantillonnage, de découpe, de montage, de meulage, de polissage et de nettoyage, entre autres, elle garantit que la qualité de surface et la précision dimensionnelle des échantillons répondent aux exigences d'essai. La mise en œuvre de cette norme contribue à améliorer la précision et la répétabilité des résultats des essais de performance du carbure cimenté et offre un support technique fiable pour les outils de coupe, les

forets miniers, les moules et d'autres domaines d'application.



COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

Copyright© 2024 CTIA All Rights Reserved
标准文件版本号 CTIAQCD-MA-E/P 2024 版
www.ctia.com.cn

电话/TEL: 0086 592 512 9696
CTIAQCD-MA-E/P 2018-2024V
sales@chinatungsten.com

CTIA GROUP LTD

30 Years of Cemented Carbide Customization Experts

Core Advantages

30 years of experience: We are well versed in cemented carbide production and processing , with mature and stable technology and continuous improvement .

Precision customization: Supports special performance and complex design , and focuses on customer + AI collaborative design .

Quality cost: Optimized molds and processing, excellent cost performance; leading equipment, RMI, ISO 9001 certification.

Serving Customers

The products cover cutting, tooling, aviation, energy, electronics and other fields, and have served more than 100,000 customers.

Service Commitment

1+ billion visits, 1+ million web pages, 100,000+ customers, and 0 complaints in 30 years!

Contact Us

Email : sales@chinatungsten.com

Tel : +86 592 5129696

Official website : www.ctia.com.cn

WeChat : Follow "China Tungsten Online"



COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

Copyright© 2024 CTIA All Rights Reserved
标准文件版本号 CTIAQCD-MA-E/P 2024 版
www.ctia.com.cn

电话/TEL: 0086 592 512 9696
CTIAQCD-MA-E/P 2018-2024V
sales@chinatungsten.com

appendice:

ISO 28079:2009

Essai de ténacité à la rupture d'un échantillon en carbure cimenté en forme de paume Métaux durs — Test de ténacité Palmqvist

1 Portée

Cette norme spécifie la méthode de mesure de la ténacité à la rupture en forme de paume des carbures cimentés et des cermetes par indentation à température ambiante. Elle s'applique à l'essai de ténacité à la rupture des carbures et carbonitrures liés à des métaux (communément appelés carbures cimentés, cermetes ou carbures cimentés), appelé ténacité à la rupture de Palmqvist, qui est calculé en mesurant la longueur totale de la fissure aux quatre coins de l'indentation de dureté Vickers. La procédure d'essai de cette norme est applicable à température ambiante (20 ± 5 °C), mais peut être étendue à des températures supérieures ou inférieures par accord. Cette procédure d'essai normalisée est applicable aux environnements d'air de laboratoire conventionnels et ne s'applique pas aux environnements corrosifs (tels que les acides forts ou l'eau de mer).

2 Références normatives

Les articles des documents suivants deviennent des articles de la présente norme par référence. Pour les documents référencés datés, seule la version référencée est applicable. Pour les documents référencés non datés, la dernière version (y compris tous les amendements) s'applique à la présente norme.

ISO 3878:1983 Carbure cimenté — Essai de dureté Vickers et de dureté Rockwell

ISO 3252:1999 Métallurgie des poudres — Terminologie

ISO 6507-1:2005 Matériaux métalliques — Essai de dureté Vickers Partie 1 : Méthode d'essai

3 Termes et définitions

Cette norme adopte la norme ISO 3252:1999 et les termes et définitions suivants :

Métaux durs

Un matériau composite composé de carbure de tungstène (WC) comme phase dure principale et de cobalt (Co) comme phase de liaison par métallurgie des poudres.

Cermetes

avec du carbonitrure (tel que TiCN) comme phase dure principale et du métal (tel que Ni, Co) comme phase de liaison.

Résistance Palmqvist

La ténacité à la rupture du carbure cimenté ou du cermet est calculée par la longueur totale de la fissure aux quatre coins de l'indentation de dureté Vickers, et l'unité est $\text{MPa} \cdot \text{m}^{1/2}$.

Indentation de dureté Vickers

Un pénétrateur diamanté Vickers (angle au sommet 136°) est utilisé pour appliquer la charge, formant une empreinte carrée sur la surface de l'échantillon.

Longueur de la fissure (l)

Longueur de la fissure en forme de paume s'étendant à partir des quatre coins de l'indentation Vickers, en mm.

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

Copyright© 2024 CTIA All Rights Reserved
标准文件版本号 CTIAQCD-MA-E/P 2024 版
www.ctia.com.cn

电话/TEL: 0086 592 512 9696
CTIAQCD-MA-E/P 2018-2024V
sales@chinatungsten.com

4 Principe du test

L'essai de ténacité à la rupture en forme de paume consiste à appliquer une empreinte de dureté Vickers à la surface d'un échantillon de carbure cémenté ou de cermet, à mesurer la longueur totale de la fissure en forme de paume depuis les quatre coins de l'empreinte et à calculer la ténacité à la rupture K_{1c} en combinant la charge d'empreinte et la dureté du matériau. La fissure en forme de paume est considérée comme superficielle (fissure non médiane) et sa longueur est fonction de la ténacité du matériau. La formule de calcul est la suivante :

$$K_{1c} = A \times \sqrt{HV} \times \sqrt{\frac{P}{T}}$$

其中:

- K_{1c} 为断裂韧性, 单位为 $\text{MPa} \cdot \text{m}^{1/2}$;
- A 为常数 (经验值, 通常取 0.0028) ;
- HV 为维氏硬度, 单位为 N/mm^2 (或 MPa) ;
- P 为压痕载荷, 单位为 N (通常为 294.2 N , 即 30 kgf) ;
- T 为四角裂纹总长度, 单位为 mm , $T = l_1 + l_2 + l_3 + l_4$.

5 Équipements de test

5.1 Testeur de dureté Vickers

Conforme aux exigences de la norme ISO 6507-1:2005.

Plage de charge : 100-500 N , précision $\pm 0,5\%$.

Contrôle du temps de maintien : 5-60 s , écart $< \pm 0,5\%$.

5.2 Pénétrateur

Pénétrateur diamant Vickers standard, angle au sommet $136^\circ (\pm 0,5^\circ)$.

La surface de l'indenteur est exempte de défauts et présente des bords nets (inspection au microscope, résolution $< 0,5 \mu\text{m}$).

5.3 Appareil de mesure

Microscope optique : grossissement $400\times$ - $600\times$, résolution $< 0,5 \mu\text{m}$.

Equippé d'un système de lecture numérique avec une précision de mesure de $\pm 0,001 \text{ mm}$.

5.4 Bloc d'étalonnage

Blocs d'étalonnage standard en carbure, plage de dureté HV 1200-2000, écart $< \pm 2\%$.

La rugosité de surface du bloc d'étalonnage est $R_a < 0,05 \mu\text{m}$.

5.5 Contrôle environnemental

Température : $20 \pm 5^\circ\text{C}$.

Humidité : $50 \pm 10\%$.

Aucune vibration, aucun environnement de gaz corrosif.

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

6. Préparation des échantillons

6.1 Exigences relatives à l'échantillon

Forme de l'échantillon : cuboïde ou cylindre, surface d'essai $> 5 \times 5$ mm, épaisseur > 2 mm.
La surface d'essai doit être plane et exempte de fissures, de couches d'oxyde ou de défauts d'usinage.
Rugosité de surface $Ra < 0,1 \mu m$ (polie).

6.2 Nombre d'échantillons

Le nombre d'échantillons dans chaque lot ne doit pas être inférieur à 5 afin de garantir la représentativité statistique.

Si l'écart de résultat est important ($> 5 \%$), le nombre d'échantillons doit être augmenté à 10.

6.3 Exemple de marquage

Les échantillons doivent être marqués avec le numéro de lot, la marque (comme YG8, YT15) et les éléments de test, et le marquage ne doit pas affecter la zone de test.

6.4 Nettoyage des échantillons

Avant le test, nettoyez la surface de l'échantillon avec de l'éthanol anhydre pour éliminer l'huile, la poussière et utilisez-le après séchage.

7 étapes de test

7.1 Étalonnage de l'équipement

Le duromètre a été étalonné à l'aide d'un bloc d'étalonnage standard, soumis à une charge de 294,2 N (30 kgf) et à trois mesures. L'écart de dureté était inférieur à $\pm 1 \%$.

Vérifiez l'état du pénétrateur pour vous assurer qu'il n'y a pas d'usure ou de défaut.

7.2 Conditions d'essai

Température ambiante : $20 \pm 5^\circ C$.

Humidité relative : $50 \pm 10\%$.

Aucune vibration, aucun environnement de gaz corrosif.

7.3 Dureté Vickers

Placez l'échantillon sur l'établi du testeur de dureté, en vous assurant que la surface d'essai est de niveau.

Sélectionnez une charge de 294,2 N (30 kgf) et un temps de maintien de 10 à 15 s.

L'indenteur est lentement enfoncé dans la surface de l'échantillon et déchargé automatiquement après avoir maintenu la charge.

5 empreintes ont été réalisées sur chaque échantillon, avec un espacement des empreintes > 5 fois la longueur de la diagonale de l'empreinte ($> 0,5$ mm) et une distance par rapport au bord de l'échantillon > 1 mm.

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

7.4 Mesure de la longueur des fissures

Un microscope optique (grossissement 400×-600×) a été utilisé pour mesurer les longueurs de fissures l_1 , l_2 , l_3 et l_4 aux quatre coins de l'indentation avec une précision de $\pm 0,001$ mm.

Calculer la longueur totale de la fissure :

$$T = l_1 + l_2 + l_3 + l_4$$

Confirmez que la fissure est une fissure en forme de paume (et non une fissure médiane ou une fissure latérale) et que la fissure doit s'étendre clairement à partir des quatre coins de l'indentation.

7.5 Mesure de la dureté Vickers

Mesurer les longueurs des deux diagonales de l'empreinte (d_1 , d_2) avec une précision de $\pm 0,001$ mm.

Calculer la longueur diagonale moyenne :

$$d = \frac{d_1 + d_2}{2}$$

Calculer la dureté Vickers :

$$HV = \frac{1.8544 \times P}{d^2}$$

Où : $P = 294,2$ N.

7.6 Calcul de la ténacité à la rupture

Calculez la ténacité à la rupture à l'aide de la formule :

$$K_{Ic} = 0.0028 \times \sqrt{HV} \times \sqrt{\frac{P}{T}}$$

Prenez la valeur moyenne de K_{Ic} de 5 indentations, avec un écart de $\leq \pm 5\%$.

8 Évaluation des résultats des tests

8.1 Plage de ténacité à la rupture

La valeur de ténacité à la fracture de la paume du carbure cémenté est généralement K_{Ic} 10-20 $\text{MPa} \cdot \text{m}^{1/2}$, et la plage spécifique dépend de la nuance et de la teneur en Co :

YG6 (6 % Co) : K_{Ic} environ 14-16 $\text{MPa} \cdot \text{m}^{1/2}$.

YG8 (8 % Co) : K_{Ic} environ 12-15 $\text{MPa} \cdot \text{m}^{1/2}$.

YG10 (10 % Co) : K_{Ic} 10-13 $\text{MPa} \cdot \text{m}^{1/2}$.

Céramiques métalliques (telles que TiCN -Ni) : K_{Ic} 8-12 $\text{MPa} \cdot \text{m}^{1/2}$.

8.2 Évaluation des écarts

L' écart de valeur K_{Ic} des 5 empreintes est $\leq \pm 5\%$, sinon un nouveau test est nécessaire.

Si la valeur K_{Ic} est en dehors de la plage attendue, la cause doit être analysée (par exemple, la morphologie de la fissure n'est pas en forme de paume ou la teneur en Co est trop élevée, ce qui n'entraîne aucune fissure).

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

8.3 Analyse des facteurs d'influence

Forme de fissure : si la fissure est une fissure médiane ou une fissure latérale (pas une fissure en forme de paume), la valeur K_{Ic} n'est pas valide.

Teneur en Co : Lorsque la teneur en Co est $> 15 \%$, aucune fissure ne peut être générée (la ténacité est trop élevée) et la méthode de la paume n'est pas applicable.

Sélection de charge : Une charge trop faible ($< 294,2 \text{ N}$) peut ne pas générer de fissures, tandis qu'une charge trop élevée ($> 490,3 \text{ N}$) peut provoquer des complications de fissures.

Qualité de surface : une rugosité de surface $R_a > 0,1 \mu\text{m}$ affectera la mesure de la longueur de la fissure (écart $> 5 \%$).

9 Rapport de test

Le rapport de test doit inclure les éléments suivants :

Informations sur l'échantillon : marque, numéro de lot, taille, teneur en Co.

Conditions d'essai : modèle d'équipement, charge ($294,2 \text{ N}$), temps de maintien ($10-15 \text{ s}$), température ambiante ($20 \pm 5^\circ\text{C}$), humidité ($50 \pm 10\%$).

T pour chaque indentation T, dureté Vickers HV HV HT, Valeurs K_{Ic} et leurs valeurs moyennes et écarts.

Conclusion de l'évaluation : si elle correspond à la plage attendue, description de la morphologie des fissures.

Date du test et signature de l'opérateur.

Annexe A (Annexe informative) Valeurs de référence de la ténacité à la fracture en forme de paume des carbures cémentés typiques

Marque	Teneur en Co (% en poids)	Dureté Vickers (HV30)	Ténacité à la fracture de la paume (K_{Ic} , $\text{MPa} \cdot \text{m}^{1/2}$)	Applications typiques
YG6	6	1500-1600	14-16	Trépans de forage minier
YG8	8	1450-1550	12-15	Outils de coupe
YG10	10	1400-1500	10-13	Moule
TiCN - Ni	10	1600-1700	8-12	Outils de finition

Annexe B (Annexe informative) Exigences relatives à l'environnement de test

Température : $20 \pm 5^\circ\text{C}$.

Humidité : $50 \pm 10\%$.

Aucune vibration, aucun environnement de gaz corrosif.

Planéité du banc d'essai : écart $< 0,02 \text{ mm/m}$.

Annexe C (Annexe informative) Schéma de la morphologie des fissures en forme de paume

Fissure en forme de paume : fissure peu profonde s'étendant depuis les quatre coins de l'indentation

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

Vickers, le chemin de la fissure étant clairement visible le long du bord de l'indentation.

Fissures non palmaires :

Fissure médiane : La fissure s'étend verticalement vers le bas à partir du bas de l'indentation.

Fissure latérale : Fissure qui se propage latéralement le long de la surface de l'échantillon et peut provoquer un écaillage.

Remarque : Seules les fissures en forme de paume sont applicables au calcul de K_{Ic} dans la présente norme.

Résumer

La norme ISO 28079:2009 « Essai de ténacité à la rupture d'éprouvettes palmaires en carbure cémenté » fournit une procédure normalisée pour les essais de ténacité à la rupture palmaire en carbure cémenté et en cermets . Elle garantit l'exactitude et la répétabilité des résultats d'essai grâce à une préparation normalisée des éprouvettes, des essais d'indentation, de la mesure des fissures et du calcul des résultats. La mise en œuvre de cette norme facilite le contrôle qualité et l'évaluation des performances du carbure cémenté, et offre un support technique fiable pour les outils de coupe, les forets miniers, les moules et d'autres domaines d'application.

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

Copyright© 2024 CTIA All Rights Reserved
标准文件版本号 CTIAQCD-MA-E/P 2024 版
www.ctia.com.cn

电话/TEL: 0086 592 512 9696
CTIAQCD-MA-E/P 2018-2024V
sales@chinatungsten.com

appendice:

ISO 6507-1:2018

Essai de dureté Vickers des matériaux métalliques

Matériaux métalliques — Essai de dureté Vickers

1 Portée

La présente norme spécifie la méthode de détermination de la dureté des matériaux métalliques (carbure cémenté, acier, fonte, métaux non ferreux, etc.) à température ambiante (10 °C à 35 °C) par l'essai de dureté Vickers. Elle comprend les principes d'essai, les exigences relatives à l'équipement, la préparation des échantillons, les étapes d'essai, le calcul et l'évaluation des résultats, le rapport d'essai, etc. Elle s'applique aux essais dans la plage de dureté Vickers de HV 1 à HV 3000, couvrant différentes charges (de 0,098 N à 2942 N). Elle ne s'applique pas aux essais de dureté des éprouvettes de petite taille ou à parois minces (épaisseur < 0,1 mm) ni aux matériaux revêtus.

2 Références normatives

Les articles des documents suivants deviennent des articles de la présente norme par référence. Pour les documents référencés datés, seule la version référencée est applicable. Pour les documents référencés non datés, la dernière version (y compris tous les amendements) s'applique à la présente norme.

ISO 6507-2:2018 Matériaux métalliques — Essai de dureté Vickers Partie 2 : Vérification et étalonnage des duromètres

ISO 6507-3:2018 Matériaux métalliques — Essai de dureté Vickers Partie 3 : Étalons d'étalonnage

ISO 376:2011 Matériaux métalliques — Étalons de force d'étalonnage

ISO 18265:2013 Matériaux métalliques — Conversion entre dureté et résistance

3 Termes et définitions

Cette norme utilise les termes et définitions suivants :

Dureté Vickers (HV) : Capacité d'un matériau métallique à résister à la pénétration d'un pénétrateur Vickers, exprimée en valeur de dureté Vickers en N/mm² (ou MPa), calculée par la longueur diagonale de l'indentation.

Pénétrateur Vickers : Pénétrateur pyramidal en forme de diamant carré avec un angle au sommet de 136°.

Diagonale d'indentation : Longueur des deux diagonales de l'indentation carrée formée lorsque le pénétrateur Vickers est enfoncé dans la surface de l'échantillon, en mm.

Charge d'essai (F) : La force appliquée au pénétrateur Vickers en Newtons (N), allant de 0,098 N à 2942 N.

de maintien : Temps pendant lequel le pénétrateur maintient la charge après l'avoir appliquée, mesuré en secondes (s).

4 Principe du test

L'essai de dureté Vickers est réalisé en pressant un pénétrateur diamant Vickers standard (angle au sommet de 136°) sur la surface d'un échantillon métallique avec une charge spécifiée, en le maintenant pendant un certain temps, puis en le relâchant. La longueur des deux diagonales de

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

Copyright© 2024 CTIA All Rights Reserved
标准文件版本号 CTIAQCD-MA-E/P 2024 版
www.ctia.com.cn

电话/TEL: 0086 592 512 9696
CTIAQCD-MA-E/P 2018-2024V
sales@chinatungsten.com

l'empreinte (d1, d2) est mesurée, la longueur diagonale moyenne (d) est calculée, puis la dureté Vickers (HV) est calculée. La formule de calcul est la suivante :

$$HV = \frac{1.8544 \times F}{d^2}$$

dans:

F 为试验载荷, 单位为 N;

d 为压痕两条对角线的平均长度, 单位为 mm, $d = \frac{d_1 + d_2}{2}$;

硬度值单位为 N/mm² (1 kgf/mm² $\approx$ 9.807 N/mm²) .

5 Équipements de test

5.1 Testeur de dureté Vickers

Conforme aux exigences de vérification et d'étalonnage de la norme ISO 6507-2:2018.

Plage de charge : 0,098 N à 2942 N (HV 0,01 à HV 30), précision $\pm 0,5\%$.

Contrôle du temps de maintien : 5 s à 60 s, écart $< \pm 0,5$ s.

5.2 Pénétrateur

Pénétrateur diamant Vickers standard, angle au sommet 136° ($\pm 0,5^\circ$).

La surface de l'indenteur est exempte de défauts et présente des bords nets (inspection au microscope, résolution $< 0,5 \mu m$) .

5.3 Appareil de mesure

Microscope optique : grossissement 50×-1000×, 400× recommandé, résolution $< 0,5 \mu m$.

Equippé d'un système de lecture numérique avec une précision de mesure de $\pm 0,001$ mm.

5.4 Bloc d'étalonnage

Blocs d'étalonnage standard conformes à la norme ISO 6507-3:2018, plage de dureté HV 100-3000, écart $< \pm 2\%$.

La rugosité de surface du bloc d'étalonnage est $Ra < 0,05 \mu m$.

5.5 Contrôle environnemental

Température : 10°C à 35°C, 20 $\pm$ 5°C recommandé.

Humidité : 30%-80%, 50 $\pm$ 10% recommandé.

Aucune vibration, aucun environnement de gaz corrosif.

6. Préparation des échantillons

6.1 Exigences relatives à l'échantillon

Forme de l'échantillon : cuboïde, cylindre ou autre forme géométrique régulière, surface d'essai $> 5 \times 5$ mm, épaisseur $> 0,5$ mm (en fonction de la charge).

La surface d'essai doit être plane et exempte de fissures, de couches d'oxyde ou de défauts d'usinage.

Rugosité de surface $Ra < 0,1 \mu m$ (polie), pour les essais à faible charge ($< 9,807$ N), $Ra < 0,05 \mu m$.

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

L'épaisseur de l'échantillon doit répondre aux exigences suivantes : épaisseur $\geq 1,5 \times$ longueur diagonale de l'empreinte.

6.2 Nombre d'échantillons

Le nombre d'échantillons dans chaque lot ne doit pas être inférieur à 3 pour garantir la représentativité statistique.

Si l'écart de résultat est important ($> 3\%$), le nombre d'échantillons doit être augmenté à 5.

6.3 Exemple de marquage

Les échantillons doivent être marqués avec le numéro de lot, la marque (comme YG8, acier 45#) et les éléments de test, et le marquage ne doit pas affecter la zone de test.

6.4 Nettoyage des échantillons

Avant le test, nettoyez la surface de l'échantillon avec de l'éthanol anhydre ou de l'acétone pour éliminer l'huile, la poussière et utilisez-le après séchage.

7 étapes de test

7.1 Étalonnage de l'équipement

Utilisez le bloc d'étalonnage standard pour étalonner le duromètre. Sélectionnez le bloc d'étalonnage correspondant à la charge d'essai. Mesurez 3 fois. L'écart de dureté est $\leq \pm 1\%$.

Vérifiez l'état du pénétrateur pour vous assurer qu'il n'y a pas d'usure ou de défaut.

7.2 Conditions d'essai

Température ambiante : 10°C à 35°C , $20 \pm 5^{\circ}\text{C}$ recommandé.

Humidité relative : 30% - 80% , $50 \pm 10\%$ recommandé.

Aucune vibration, aucun environnement de gaz corrosif.

7.3 Sélection de la charge

Sélectionnez la charge en fonction de la dureté du matériau et de l'épaisseur de l'échantillon :

Carbure : $294,2\text{ N}$ (30 kgf , HV 30) est recommandé.

Acier : 50 N à $294,2\text{ N}$ (HV 5 à HV 30).

Échantillons à parois minces : $0,098\text{ N}$ à $9,807\text{ N}$ (HV 0,01 à HV 1).

La charge doit garantir que la longueur diagonale d de l'empreinte est comprise entre $0,020\text{ mm}$ et $1,400\text{ mm}$.

7.4 Test de fonctionnement

Placez l'échantillon sur l'établi du testeur de dureté, en vous assurant que la surface d'essai est de niveau.

Sélectionnez une charge appropriée (par exemple $294,2\text{ N}$) et maintenez la charge pendant 10 à 15 s (ou ajustez-la en fonction des exigences du matériau).

L'indenteur est lentement enfoncé dans la surface de l'échantillon et déchargé automatiquement.

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

après avoir maintenu la charge.

5 points d'indentation doivent être mesurés pour chaque échantillon, avec un espacement d'indentation > 3 fois la longueur diagonale (> 0,3 mm) et une distance du bord de l'échantillon > 0,5 mm.

7.5 Mesure et calcul

Les longueurs des deux lignes diagonales de l'indentation (d_1 , d_2) ont été mesurées à l'aide d'un microscope optique avec une précision de $\pm 0,001$ mm.

Calculer la longueur diagonale moyenne :

$$d = \frac{d_1 + d_2}{2}$$

Calculer la dureté Vickers :

$$HV = \frac{1.8544 \times F}{d^2}$$

cinq points d'indentation sont considérés comme la valeur de dureté de l'échantillon, avec un écart de $\leq \pm 3\%$.

8 Évaluation des résultats des tests

8.1 Plage de valeurs de dureté

Plage de dureté Vickers des matériaux métalliques : HV 100-3000, la valeur spécifique dépend du matériau :

Carbure cimenté (YG8) : HV 1450-1550.

Acier trempé (45#) : HV 500-700.

d'aluminium : HV 50-150.

8.2 Évaluation des écarts

les 5 points d'indentation sont $\leq \pm 3\%$, sinon un nouveau test est nécessaire.

Si la valeur de dureté dépasse les exigences techniques du matériau, la cause doit être analysée (comme des défauts de surface, une inadéquation de charge).

8.3 Analyse des facteurs d'influence

Sélection de la charge : Si la charge est trop faible ($< 0,098$ N), une indentation nette peut ne pas se former ; si la charge est trop élevée (> 2942 N), l'échantillon peut être déformé.

Qualité de surface : Une rugosité de surface $R_a > 0,1$ μm entraînera des valeurs de dureté inférieures (écart $> 5\%$).

de séjour : Un temps < 5 s ou > 60 s affectera la taille de l'indentation (écart $\pm 2\%$).

Épaisseur de l'échantillon : une épaisseur $< 1,5 \times$ la longueur diagonale de l'indentation entraînera un effet de support et une valeur de dureté élevée (écart $> 10\%$).

9 Rapport de test

Le rapport de test doit inclure les éléments suivants :

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

Informations sur l'échantillon : type de matériau, marque, numéro de lot, taille.
Conditions d'essai : modèle d'équipement, charge (N), temps de maintien (s), température ambiante (10°C à 35°C), humidité (30%-80%).
Résultats des tests : longueur diagonale moyenne de chaque indentation (d), valeur de dureté (HV), valeur de dureté moyenne et écart.
Conclusion de l'évaluation : si le matériel répond aux exigences techniques.
Date du test et signature de l'opérateur.

Annexe A (Annexe informative) Valeurs de référence de dureté Vickers pour les matériaux métalliques typiques

Type de matériau	Marque/catégorie	Dureté Vickers (HV)	Charge typique (N)	Applications typiques
carbure cémenté	YG8	1450-1550	294,2	Outils de coupe
Acier trempé	45# (HRC 50)	500-700	294,2	Pièces mécaniques
alliage d'aluminium	6061-T6	50-150	9.807	Structures aérospatiales
fonte	HT250	200-300	98.07	Bloc moteur

Annexe B (Annexe informative) Tableau de la relation entre la dureté Vickers et la charge

Charge (N)	Symbole de dureté	Plage de longueur diagonale de l'indentation (mm)	Matériaux applicables
0,098	HV 0,01	0,020-0,050	Parois minces ou petits spécimens
9.807	HV 1	0,050-0,150	Métaux mous (comme l'aluminium)
98.07	HV 10	0,150-0,400	Matériaux moyennement durs (comme la fonte)
294,2	HV 30	0,400-1,000	Alliage dur, acier
2942	HV 300	1.000-1.400	Matériaux extra-durs

Annexe C (Annexe informative) Exigences relatives à l'environnement de test

Température : 10°C à 35°C, 20±5°C recommandé.
Humidité : 30%-80%, 50±10% recommandé.
Aucune vibration, aucun environnement de gaz corrosif.
Planéité du banc d'essai : écart < 0,02 mm/m.

Résumer

La norme ISO 6507-1:2018 « Essai de dureté Vickers pour les matériaux métalliques » fournit une procédure normalisée pour l'essai de dureté Vickers des matériaux métalliques, garantissant la précision et la répétabilité des résultats d'essai grâce à une préparation d'éprouvettes, des étapes

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

d'essai et une évaluation normalisées. La mise en œuvre de cette norme s'applique au contrôle qualité et à l'évaluation des performances de matériaux tels que le carbure cimenté, l'acier et les alliages d'aluminium, offrant ainsi un support technique fiable pour des domaines d'application tels que la fabrication de machines, l'aéronautique et la fabrication de moules.

appendice:

ISO 6507-1:2018

Matériaux métalliques - Essai de dureté Vickers

Partie 1 : Méthodes d'essai

1 Portée

La présente norme spécifie la méthode d'essai de dureté Vickers pour les matériaux métalliques (y compris le carbure cémenté), applicable à l'essai avec une plage de forces d'essai de 1,961 N (0,2 kgf) à 1 177 N (120 kgf). Elle comprend l'essai de dureté Vickers macro (force d'essai de 9,807 N à 1 177 N) et l'essai de dureté Vickers micro (force d'essai de 1,961 N à 9,807 N). Cette norme s'applique à l'essai de dureté de divers matériaux métalliques, notamment l'acier, la fonte, les métaux non ferreux et le carbure cémenté, et fournit les procédures d'essai, les méthodes de mesure et les exigences de traitement des résultats.

2 Références normatives

Les clauses énumérées dans les documents suivants deviennent les clauses de la présente norme par référence. Pour les documents référencés avec date, seules les versions référencées s'appliquent ; pour les documents référencés sans date, les versions les plus récentes (y compris tous les amendements) s'appliquent.

ISO 6507-2:2018 Matériaux métalliques — Essai de dureté Vickers Partie 2 : Vérification et étalonnage des duromètres

ISO 6507-3:2018 Matériaux métalliques — Essai de dureté Vickers Partie 3 : Étalonnage des blocs de référence

ISO 376:2011 Matériaux métalliques — Étalonnage des systèmes de mesure de force pour machines d'essai statiques de traction, de compression et de poussée

3 Termes et définitions

Le présent document s'applique à la norme ISO 3850:2018 (Terminologie des carbures cémentés) et aux définitions suivantes :

Dureté Vickers (HV) : Valeur de dureté déterminée par le rapport entre la force d'essai appliquée et la surface d'indentation, avec des unités de HV.

Force d'essai (F) : Force appliquée par le pénétrateur sur l'échantillon, exprimée en Newtons (N) ou en kilogrammes-force (kgf).

Indentation : Indentation carrée formée sur la surface de l'échantillon par un pénétrateur pyramidal quadrangulaire en diamant.

Longueur diagonale (d) : Longueur moyenne des deux diagonales de l'indentation, en millimètres (mm).

4 Principe

La détermination de la dureté Vickers repose sur l'application d'une force d'essai spécifique, l'enfoncement d'un pénétrateur pyramidal quadrangulaire en diamant (angle au sommet de 136°) dans la surface de l'échantillon, la mesure de la diagonale de l'empreinte et le calcul de la dureté. Cette valeur est calculée selon la formule suivante : $HV = 1,8544 \cdot F / d^2$

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

Copyright© 2024 CTIA All Rights Reserved
标准文件版本号 CTIAQCD-MA-E/P 2024 版
www.ctia.com.cn

电话/TEL: 0086 592 512 9696
CTIAQCD-MA-E/P 2018-2024V
sales@chinatungsten.com

dans:

HV est la dureté Vickers (unité : kgf /mm² ou N/ mm²) ,

F est la force d'essai appliquée (unité : N),

d est la longueur diagonale moyenne de l'indentation (unité : mm).

5 Équipements de test

5.1 Testeur de dureté Vickers

Plage de force d'essai : 1,961 N à 1 177 N, précision $\pm 1,0 \%$.

Pénétrateur : Pyramide quadrangulaire en diamant, angle au sommet $136^{\circ} \pm 0,5^{\circ}$, rayon de pointe $< 0,002$ mm.

Système de mesure : Microscope avec grossissement de $200\times$ à $500\times$, résolution $\leq 0,001$ mm.

Temps de chargement : 10 à 15 secondes, précision ± 1 seconde.

5.2 Contrôle environnemental

Température : 10°C à 35°C , $23 \pm 2^{\circ}\text{C}$ recommandé.

Humidité : 30% à 70%, $50 \pm 10\%$ recommandé.

Aucune vibration, aucun environnement de gaz corrosif.

6. Exigences relatives à l'échantillon

6.1 Forme et taille

L'échantillon doit être suffisamment grand pour garantir que l'empreinte soit au moins 2,5 fois la longueur diagonale du bord et des empreintes adjacentes.

Épaisseur recommandée : au moins 0,5 fois la profondeur d'indentation maximale correspondant à la force d'essai (environ $0,07 \times d$).

6.2 Préparation de la surface

La rugosité de surface $R_a \leq 0,2 \mu\text{m}$, doit être plane, sans couche d'oxyde ni fissures.

Utilisez du papier de verre diamanté de 600# à 2500# pour le meulage et du liquide de polissage à l'oxyde d'aluminium de $0,25 \mu\text{m}$ pour le polissage.

6.3 Nombre d'échantillons

Chaque lot doit comporter au moins 3 échantillons, ce nombre pouvant être porté à 5 dans des cas particuliers afin d'assurer la représentativité.

7 Procédures de test

7.1 Étalonnage de l'équipement

Vérification des duromètres selon la norme ISO 6507-2, y compris l'étalonnage de la force d'essai, du pénétrateur et du système de mesure.

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

7.2 Conditions d'essai

Sélectionnez la force d'essai appropriée au matériau (voir tableau 1).

Assurez-vous que la surface de l'échantillon est propre et exempte de poussière ou d'huile avant le chargement.

7.3 Test de fonctionnement

Placez l'échantillon sur le banc d'essai du duromètre et ajustez-le pour qu'il soit de niveau.

Sélectionnez une force d'essai et appliquez la charge pendant 10 à 15 secondes.

Une fois la charge retirée, les longueurs des deux diagonales de l'indentation, d_1 et d_2 , sont mesurées à l'aide d'un microscope.

Calculez la longueur diagonale moyenne $d = (d_1 + d_2) / 2$.

Mesurer au moins 3 emplacements différents sur l'échantillon avec un intervalle de $\geq 2,5$ mm.

7.4 Calcul des résultats

Calculer la dureté Vickers :

$$HV = \frac{1.8544 \cdot F}{d^2}$$

Calculer la moyenne :

$$\bar{HV} = \frac{\sum HV_i}{n}$$

Où HV_i est une valeur de mesure unique et n est le nombre de mesures.

Calculer l'écart type :

$$s = \sqrt{\frac{\sum (HV_i - \bar{HV})^2}{n - 1}}$$

Assurez-vous que l'écart de la valeur mesurée est $< \pm 2,0$ %.

8 Sélection de la force d'essai

Type de matériau **Force d'essai recommandée (N)** **Plage de dureté typique (HV)**

carbure cémenté 9,807 - 98,07 1000 - 2000

Acier trempé 9,807 - 294,2 500 - 1000

Métaux non ferreux 1,961 - 9,807 50 - 200

Remarque : la force d'essai doit être sélectionnée en fonction de la dureté du matériau et de l'épaisseur de l'échantillon.

9 Évaluation des résultats

9.1 Plage de dureté

La valeur de dureté doit être cohérente avec les propriétés du matériau, par exemple, la plage de dureté du carbure cémenté YG6 est de 1400 à 1600 HV.

9.2 Évaluation des écarts

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

les trois points de mesure sont $\leq \pm 2,0\%$ et l'écart type est ≤ 20 HV, sinon un nouveau test est nécessaire.

9.3 Facteurs d'influence

Rugosité de surface : $R_a > 0,2 \mu\text{m}$ peut entraîner une valeur de dureté inférieure de 5 à 10 %.

Force d'essai : un écart de force de $\pm 1,0\%$ peut entraîner un écart de 2 à 3 % dans le résultat.

Temps de chargement : Des temps < 10 s ou > 15 s peuvent affecter la forme de l'indentation.

10 Rapport de test

Le rapport de test doit inclure les éléments suivants :

Informations sur l'échantillon : type de matériau, marque, taille.

Conditions d'essai : modèle de testeur de dureté, force d'essai, temps de chargement, température ambiante (10°C à 35°C), humidité (30%-70%).

Résultats des tests : valeur de dureté à chaque point, valeur moyenne, écart type et écart.

Conclusion de l'évaluation : si le projet répond aux exigences techniques.

Date du test et signature de l'opérateur.

Annexe A (Annexe informative) Valeurs de référence de la dureté des matériaux métalliques typiques

Type de matériau	Marque/État	Plage de dureté (HV)	Applications typiques
carbure cimenté	YG6	1400-1600	Trépans de forage minier
Acier trempé	42CrMo	500-700	Composants mécaniques
Métaux non ferreux	Cu-ETP	50-100	Matériel électrique

Annexe B (Annexe informative) Exigences environnementales

Température : 10°C à 35°C , $23 \pm 2^\circ\text{C}$ recommandé.

Humidité : 30%-70%, $50 \pm 10\%$ recommandé.

Aucune vibration, aucun environnement de gaz corrosif.

Planéité du banc d'essai : écart $< 0,02$ mm/m.

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

appendice:

ISO 6507-2:2018

Matériaux métalliques - Essai de dureté Vickers

Partie 2 : Vérification et étalonnage des duromètres

1 Portée

La présente norme spécifie les méthodes de vérification et d'étalonnage des machines d'essai de dureté Vickers pour la détermination de la dureté Vickers des matériaux métalliques (y compris les carbures cémentés) conformément à l'ISO 6507-1. Elle couvre les méthodes de vérification directe et indirecte visant à garantir l'exactitude et la fiabilité des mesures de dureté. Elle s'applique aux machines d'essai de dureté Vickers macro et micro, dont la plage de forces d'essai est comprise entre 1,961 N (0,2 kgf) et 1 177 N (120 kgf), y compris les procédures d'inspection et de maintenance périodiques.

2 Références normatives

Les clauses énumérées dans les documents suivants deviennent les clauses de la présente norme par référence. Pour les documents référencés avec date, seules les versions référencées s'appliquent ; pour les documents référencés sans date, les versions les plus récentes (y compris tous les amendements) s'appliquent.

ISO 6507-1:2018 Matériaux métalliques — Essai de dureté Vickers Partie 1 : Méthode d'essai

ISO 6507-3:2018 Matériaux métalliques — Essai de dureté Vickers Partie 3 : Étalonnage des blocs de référence

Exigences générales relatives à la compétence des laboratoires d'essais et d'étalonnage

3 Termes et définitions

Le présent document applique les termes et définitions donnés dans la norme ISO 6507-1:2018 et inclut les définitions suivantes :

Vérification directe : Processus de vérification des performances d'un testeur de dureté Vickers en mesurant directement ses composants, tels que la force d'essai, la géométrie du pénétrateur et le système de mesure.

Vérification indirecte : Processus de vérification des performances d'une machine d'essai de dureté Vickers en testant un bloc de référence normalisé.

Dureté Vickers (HV) : Valeur de dureté déterminée par le rapport entre la force d'essai appliquée et la surface d'indentation, avec des unités de HV.

Force d'essai : Force appliquée par le pénétrateur sur l'échantillon, exprimée en Newtons (N) ou en kilogrammes-force (kgf).

4 Exigences générales

4.1 Domaine d'application

La présente norme s'applique à toutes les machines d'essai de dureté Vickers, couvrant la plage de forces d'essai de 1,961 N à 1 177 N, y compris les machines manuelles, semi-automatiques et entièrement automatiques.

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

Copyright© 2024 CTIA All Rights Reserved
标准文件版本号 CTIAQCD-MA-E/P 2024 版
www.ctia.com.cn

电话/TEL: 0086 592 512 9696
CTIAQCD-MA-E/P 2018-2024V
sales@chinatungsten.com

4.2 Responsabilité

La vérification et l'étalonnage doivent être effectués par du personnel qualifié ou des opérateurs formés conformément aux exigences de la norme ISO/IEC 17025.

4.3 Fréquence

Vérification initiale : effectuée après la livraison ou la réparation du duromètre.

Vérification périodique : Au moins une fois tous les 12 mois, ou après une utilisation importante (par exemple 10 000 tests).

Inspection intermédiaire : Effectuez une inspection simple avant chaque utilisation pour vous assurer que les fonctions de base sont normales.

5 Vérification directe

5.1 Vérification de la force d'essai

Matériel : Utiliser un capteur de force calibré avec une précision de $\pm 0,5\%$.

programme :

Appliquez une force d'essai (1,961 N à 1 177 N) et enregistrez la valeur de force réelle.

Assurez-vous que l'écart de valeur de force est compris entre $\pm 1,0\%$.

Enregistrement : Enregistrez la valeur de la force et l'écart de chaque mesure.

5.2 Vérification de la géométrie du pénétrateur

Matériel : Utiliser un microscope optique ou une méthode de comparaison d'indentation standard avec un grossissement $\geq 200\times$.

programme :

Vérifiez l'angle supérieur du pénétrateur diamanté ($136^\circ \pm 0,5^\circ$) et le rayon de la pointe ($< 0,002$ mm).

Assurez-vous que le pénétrateur n'est pas fissuré ou usé.

Enregistrement : Enregistrez les paramètres de pression et les résultats d'inspection.

5.3 Vérification du système de mesure

Matériel : Utiliser un microscope calibré avec une résolution $\leq 0,001$ mm.

programme :

Mesurer la longueur diagonale de l'empreinte standard, avec un écart de $\leq \pm 0,5\%$.

Vérifier la cohérence du système de mesure sur toute la plage de grossissement.

Enregistrement : Enregistrez les mesures et les écarts de longueur diagonale.

6 Vérification indirecte

6.1 Exigences relatives aux blocs de référence

En utilisant des blocs de référence étalonnés conformément à la norme ISO 6507-3, la plage de dureté couvre les valeurs typiques dans la plage de force d'essai.

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

La rugosité de surface du bloc de référence est $Ra \leq 0,2 \mu m$.

6.2 Procédure de test

Préparation : Sélectionner au moins 5 blocs de référence de valeurs de dureté différentes.

opérer :

Au moins 5 mesures ont été effectuées sur chaque bloc de référence, avec un intervalle de $\geq 2,5 mm$.
Enregistrez la valeur de dureté pour chaque mesure.

calculer :

Calculez la valeur moyenne de dureté et l'écart type.

Assurez-vous que la valeur mesurée est comprise entre $\pm 2,0 \%$ et la valeur d'étalonnage du bloc de référence.

6.3 Évaluation des résultats

Si l'écart dépasse $\pm 2,0 \%$, le testeur de dureté doit être ajusté ou réparé et revérifié.

7 Étalonnage

7.1 Cycle d'étalonnage

L'étalonnage doit être effectué après chaque vérification directe ou après un échec de vérification indirecte.

Il est recommandé de calibrer une fois par an, ou d'ajuster en fonction de la fréquence d'utilisation.

7.2 Procédure d'étalonnage

Étalonnage de la force de test : utilisez des poids standard pour ajuster la valeur de la force, l'écart est $< \pm 0,5 \%$.

Calibrage du pénétrateur : Remplacez ou rectifiez le pénétrateur pour garantir que la géométrie répond aux exigences.

Calibrage du système de mesure : Utiliser une échelle standard pour régler le microscope, avec un écart de $< \pm 0,2 \%$.

7.3 Certificat d'étalonnage

Fournir un certificat d'étalonnage comprenant le numéro de l'équipement, la date d'étalonnage, la signature de l'opérateur et l'analyse des incertitudes.

8 Maintenance et enregistrements

8.1 Entretien

Nettoyez régulièrement la tête de pression et le système de mesure pour éviter la poussière ou l'huile.
Vérifiez les connexions électriques et les pièces mécaniques pour vous assurer que rien n'est desserré.

8.2 Enregistrements

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

Conservez les enregistrements de chaque vérification et étalonnage pendant au moins 5 ans, y compris les données brutes et l'analyse des résultats.

9 Rapport de test

Le rapport de test doit inclure les éléments suivants :

Modèle et numéro de série du duromètre.

Date du test et conditions environnementales (température 10°C à 35°C, humidité 30%-70%).

Vérification directe des résultats (force d'essai, pénétrateur, données du système de mesure).

Résultats de vérification indirecte (numéro de bloc de référence, valeur de mesure, écart).

Résultats d'étalonnage (données avant et après ajustement, incertitude).

Signature de la personne vérifiant et calibrant.

Annexe A (Annexe informative) Valeurs de référence typiques des paramètres de vérification

Force d'essai (N)	force (%)	Écart de l'angle supérieur du pénétrateur (°)	Écart du système de mesure (%)
9.807	±1,0	±0,5	±0,5
98.07	±1,0	±0,5	±0,5
1177	±1,0	±0,5	±0,5

Annexe B (Annexe informative) Exigences environnementales

Température : 10°C à 35°C, 23±2°C recommandé.

Humidité : 30%-70%, 50±10% recommandé.

Aucune vibration, aucun environnement de gaz corrosif.

Planéité du banc d'essai : écart < 0,02 mm/m.

Résumer

La norme ISO 6507-2:2018 « Matériaux métalliques – Essai de dureté Vickers – Partie 2 : Vérification et étalonnage des duromètres » fournit une procédure normalisée internationale pour la vérification et l'étalonnage des machines d'essai de dureté Vickers, garantissant l'exactitude et la fiabilité des résultats de mesure par des méthodes directes et indirectes. La mise en œuvre de cette norme contribue à améliorer le contrôle qualité des essais de dureté et fournit un support technique pour l'évaluation des performances des matériaux métalliques (y compris le carbure cémenté).

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

appendice:

ISO 6507-3:2018

Matériaux métalliques - Essai de dureté Vickers

Partie 3 : Normes d'étalonnage

1 Portée

Cette norme spécifie la méthode d'étalonnage des blocs étalons pour l'essai de dureté Vickers afin de garantir l'exactitude et la traçabilité des valeurs de dureté. Elle s'applique à l'essai de dureté Vickers des matériaux métalliques (y compris le carbure cémenté). La plage de dureté des blocs étalons s'étend de 20 HV à 2 000 HV, et la plage de force d'essai est de 1,961 N (0,2 kgf) à 1 177 N (120 kgf), incluant la dureté macro Vickers (force d'essai de 9,807 N à 1 177 N) et la dureté micro Vickers (force d'essai de 1,961 N à 9,807 N). Cette norme s'applique aux laboratoires d'étalonnage et aux utilisateurs de duromètres afin de vérifier les performances des machines d'essai de dureté Vickers.

2 Références normatives

Les clauses énumérées dans les documents suivants deviennent les clauses de la présente norme par référence. Pour les documents référencés avec date, seules les versions référencées s'appliquent ; pour les documents référencés sans date, les versions les plus récentes (y compris tous les amendements) s'appliquent.

ISO 6507-1:2018 Matériaux métalliques — Essai de dureté Vickers Partie 1 : Méthode d'essai

ISO 6507-2:2018 Matériaux métalliques — Essai de dureté Vickers Partie 2 : Vérification et étalonnage des duromètres

Exigences générales relatives à la compétence des laboratoires d'essais et d'étalonnage

3 Termes et définitions

Le présent document applique les termes et définitions donnés dans la norme ISO 6507-1:2018 et inclut les définitions suivantes :

Bloc standard : Bloc métallique avec une valeur de dureté connue et une microstructure uniforme utilisé pour étalonner une machine d'essai de dureté Vickers.

Étalonnage : Processus de détermination de la valeur de dureté et de son incertitude d'un bloc étalon par comparaison avec un étalon de qualité supérieure.

Traçabilité : Propriété de relier les résultats de mesure à des normes internationales ou nationales par une chaîne ininterrompue de comparaisons.

Dureté Vickers (HV) : Valeur de dureté déterminée par le rapport entre la force d'essai appliquée et la surface d'indentation, avec des unités de HV.

4 exigences de bloc standard

4.1 Exigences matérielles

Le matériau du bloc standard doit avoir une microstructure uniforme avec un écart de dureté de $<\pm 1,0\%$.

Matériaux courants : Acier trempé, carbure cémenté ou alliages de cuivre dans la plage de dureté de

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

Copyright© 2024 CTIA All Rights Reserved
标准文件版本号 CTIAQCD-MA-E/P 2024 版
www.ctia.com.cn

电话/TEL: 0086 592 512 9696
CTIAQCD-MA-E/P 2018-2024V
sales@chinatungsten.com

20 HV à 2000 HV.

Rugosité de surface $Ra \leq 0,1 \mu m$, pas de fissures, de couche d'oxyde ou d'inclusions.

4.2 Exigences de taille

Taille recommandée : diamètre 50 mm ou 50×50 mm, épaisseur ≥ 6 mm (macro-Vickers) ou ≥ 1 mm (micro-Vickers).

L'écart de planéité de la surface d'essai est $< 0,005$ mm.

4.3 Uniformité de la dureté

L'écart de dureté de la surface d'essai du bloc standard est $< \pm 1,0$ %, vérifié en mesurant au moins 5 points.

5. Équipement d'étalonnage

5.1 Testeur de dureté Vickers

Conforme aux exigences de la norme ISO 6507-2, précision de la force d'essai $\pm 0,5$ %, angle supérieur du pénétrateur $136^\circ \pm 0,5^\circ$.

La résolution du système de mesure est $\leq 0,001$ mm et l'écart est $< \pm 0,5$ %.

5.2 Contrôle environnemental

Température : $20^\circ C \pm 1^\circ C$.

Humidité : 30% à 70%, 50 ± 10 % recommandé.

Aucune vibration, aucun environnement de gaz corrosif.

5.3 Équipement de référence pour l'étalonnage

En utilisant des blocs standard de qualité supérieure reconnus au niveau national ou international, l'incertitude de dureté est $< \pm 0,5$ %.

6 Procédure d'étalonnage

6.1 Préparation

Nettoyez la surface du bloc standard pour vous assurer qu'il n'y a pas de poussière ou d'huile.

Calibrer les duromètres Vickers conformément à la norme ISO 6507-2.

6.2 Conditions d'essai

Sélectionnez la force d'essai : selon la plage de dureté du bloc standard (voir tableau 1).

Temps de chargement : 10 à 15 secondes, précision ± 1 seconde.

6.3 Opération d'étalonnage

Mesurer au moins 5 positions uniformément réparties sur la surface d'essai du bloc standard, avec un intervalle de $\geq 2,5$ mm.

d_1 et d_2 de chaque indentation ont été mesurés, et la valeur moyenne $d = (d_1 + d_2) / 2$ a été calculé.

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

Calculer la dureté Vickers : $HV=1,8544 \cdot F/d^2$

Où F est la force d'essai (N) et d est la longueur diagonale moyenne (mm).

6.4 Traitement des résultats

Calculer la valeur moyenne de dureté de 5 points de mesure :

$$\bar{HV} = \frac{\sum HV_i}{5}$$

Calculer l'écart type :

$$s = \sqrt{\frac{\sum (HV_i - \bar{HV})^2}{4}}$$

Assurez-vous que l'écart de dureté est $\leq \pm 1,0 \%$ et l'écart type $< 5 HV$.

7 Sélection de la force d'essai

Plage de dureté (HV)	Force d'essai recommandée (N)	Type d'application
20 - 200	1,961 - 9,807	Vickers microscopique
200 - 1000	9,807 - 98,07	Macro Vickers
1000 - 2000	98,07 - 294,2	Essais de carbure

8 Évaluation de l'incertitude

8.1 Sources d'incertitude

Écart de force d'essai : $\pm 0,5 \%$ peut entraîner un écart de dureté de $\pm 1,0 \%$.

Écart de mesure diagonale : $\pm 0,5 \%$ peut entraîner un écart de dureté de $\pm 1,0 \%$.

Variations de température : $\pm 1^\circ C$ peut entraîner un écart de dureté de $\pm 0,5 \%$.

8.2 Calcul de l'incertitude

Incrtitude globale U (incrtitude élargie, $k=2$) :

$$U = 2 \cdot \sqrt{u_{\text{force}}^2 + u_{\text{diagonal}}^2 + u_{\text{temp}}^2}$$

Incrtitude typique : $\pm 2 \%$ (environ $\pm 20 HV$ pour des valeurs de dureté de 1 000 HV).

9 Certificat d'étalonnage

Le certificat d'étalonnage doit contenir les éléments suivants :

Numéro de bloc standard et informations sur le matériau.

Date d'étalonnage et conditions environnementales (température $20^\circ C \pm 1^\circ C$, humidité 30%-70%).

Force d'essai et valeur de dureté, valeur moyenne et écart type de 5 points de mesure.

Analyse d'incertitude (incrtitude élargie, $k=2$).

Nom et signature de l'organisme d'étalonnage.

10 Entretien et utilisation des blocs standards

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

10.1 Entretien

Conserver dans un dessiccateur pour éviter l'oxydation ou la contamination.
de surface $Ra > 0,1 \mu\text{m}$, elle doit être repolie.

10.2 Utilisation

Nettoyez la surface avant chaque utilisation pour éviter que la poussière ou l'huile n'affecte la mesure. Après avoir été utilisé plus de 100 fois, un recalibrage est nécessaire.

Annexe A (Annexe informative) Valeurs de référence de dureté des blocs standards typiques

Type de matériau	de Plage (HV)	de dureté Force (N)	d'essai Applications typiques
carbure cimenté	1400-1600	98.07	Étalonnage du test de carbure
Acier trempé	500-700	49.03	Essais d'étalonnage de l'acier
alliage de cuivre	50-100	4.903	Étalonnage pour les tests de métaux non ferreux

Annexe B (Annexe informative) Exigences environnementales

Température : 20°C ±1°C.

Humidité : 30%-70%, 50±10% recommandé.

Aucune vibration, aucun environnement de gaz corrosif.

Planéité du banc d'essai : écart $< 0,02$ mm/m.

appendice:

ISO 3327:2009

Méthode d'essai pour la résistance à la compression du carbure cimenté Métaux durs — Détermination de la résistance à la rupture transversale

1 Portée

Français La présente norme spécifie la méthode de détermination de la résistance à la rupture transversale du carbure cimenté par essai de flexion en trois ou quatre points à température ambiante (10 °C à 35 °C), y compris le principe d'essai, les exigences relatives à l'équipement, la préparation des échantillons, les étapes d'essai, le calcul et l'évaluation des résultats, le rapport d'essai, etc. La présente norme s'applique au carbure cimenté avec du carbure de tungstène (WC) comme phase dure principale et du cobalt (Co) comme phase de liaison, ainsi qu'au carbure cimenté avec d'autres carbures (tels que TaC, TiC, VC). Cette norme ne s'applique pas au carbure cimenté revêtu ni au carbure cimenté après renforcement de surface (tel que l'essai de résistance à la compression de la couche cimentée).

Remarque : La « résistance à la compression » dans cette norme est interprétée comme la résistance à la rupture transversale (TRS), selon les exigences des utilisateurs. La résistance à la compression du carbure cimenté étant généralement bien supérieure à sa résistance à la flexion, la norme ISO 3327:2009 se concentre principalement sur l'essai de résistance à la rupture transversale.

2 Références normatives

Les articles des documents suivants deviennent des articles de la présente norme par référence. Pour les documents référencés datés, seule la version référencée est applicable. Pour les documents référencés non datés, la dernière version (y compris tous les amendements) s'applique à la présente norme.

ISO 3878:1983 Carbure cimenté — Essai de dureté Vickers et de dureté Rockwell

ISO 4506:1979 Carbure cimenté — Préparation des éprouvettes et conditions d'essai

ISO 3611:2010 Carbure cimenté — Terminologie

ISO 7500-1:2015 Matériaux métalliques — Étalons de force pour les essais de traction et de compression Partie 1 : Étalons de force d'étalonnage

3 Termes et définitions

Cette norme adopte la norme ISO 3611:2010 et les termes et définitions suivants :

Métaux durs : Matériau composite composé de carbure de tungstène (WC) comme phase dure principale et de cobalt (Co) comme phase de liaison par le biais d'un procédé de métallurgie des poudres.

Résistance à la rupture transversale (TRS) : La contrainte maximale à laquelle un échantillon de carbure cimenté résiste lors d'un essai de flexion en trois ou quatre points, mesurée en MPa, reflète la capacité du matériau à résister à la rupture par flexion.

Flexion en trois points : essai de flexion dans lequel une charge ponctuelle unique est appliquée à l'échantillon en deux points d'appui.

Flexion en quatre points : essai de flexion dans lequel une charge uniforme est appliquée à l'échantillon entre deux points d'appui et deux points de chargement.

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

Copyright© 2024 CTIA All Rights Reserved
标准文件版本号 CTIAQCD-MA-E/P 2024 版
www.ctia.com.cn

电话/TEL: 0086 592 512 9696
CTIAQCD-MA-E/P 2018-2024V
sales@chinatungsten.com

4 Principe du test

L'essai de résistance à la rupture transversale consiste à appliquer une charge de flexion en trois ou quatre points sur l'éprouvette en carbure cémenté jusqu'à sa rupture, à enregistrer la charge de rupture maximale et à calculer la résistance à la rupture transversale (TRS) en fonction de la géométrie de l'éprouvette. La formule de calcul varie selon le type d'essai :

Flexion trois points :

$$TRS = \frac{3FL}{2bh^2}$$

Flexion à quatre points :

$$TRS = \frac{3FL}{4bh^2} \times \frac{l_1}{l}$$

dans:

F est la charge de rupture maximale, en N ;

L est la portée du support, en mm ;

l_1 est la distance entre les points de chargement, en mm (uniquement pour la flexion à quatre points) ;

b est la largeur de l'échantillon, en mm ;

h est l'épaisseur de l'échantillon en mm.

5 Équipements de test

5.1 Machine d'essai universelle

Plage de charge : 0-50 kN , précision $\pm 0,5\%$.

Contrôle de la vitesse de chargement : 0,1-1 mm/min, écart $\leq \pm 0,05$ mm/min.

Conforme aux exigences d'étalonnage de la norme ISO 7500-1:2015.

5.2 Fixation

Dispositif de pliage à trois points : portée du support 14,5 mm ($\pm 0,05$ mm), diamètre du point d'appui 2 mm ($\pm 0,02$ mm).

Dispositif de pliage à quatre points : portée du support 20 mm ($\pm 0,05$ mm), espacement des points de chargement 10 mm ($\pm 0,05$ mm), diamètre du point de support 2 mm ($\pm 0,02$ mm).

La surface du luminaire est lisse et ne présente ni bords ni coins.

5.3 Outils de mesure

Pied à coulisse : précision $\pm 0,02$ mm.

Micromètre numérique : précision $\pm 0,001$ mm.

5.4 Contrôle environnemental

Température : 10°C à 35°C, 20 $\pm$ 5°C recommandé.

Humidité : 30%-80%, 50 $\pm$ 10% recommandé.

Aucune vibration, aucun environnement de gaz corrosif.

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

6. Préparation des échantillons

6.1 Exigences relatives à l'échantillon

Forme de l'échantillon : cuboïde, dimensions $20 \times 6,5 \times 5,25$ mm ($\pm 0,05$ mm), ou ajustée selon le protocole.

La surface d'essai doit être plane et exempte de fissures, de couches d'oxyde ou de défauts d'usinage. Rugosité de surface $Ra < 0,2 \mu\text{m}$ (polie).

Les bords des échantillons ont été chanfreinés de $0,1 \times 45^\circ$ pour réduire la concentration de contraintes.

6.2 Nombre d'échantillons

Le nombre d'échantillons dans chaque lot ne doit pas être inférieur à 5 afin de garantir la représentativité statistique.

Si l'écart de résultat est important ($> 5\%$), le nombre d'échantillons doit être augmenté à 10.

6.3 Exemple de marquage

Les échantillons doivent être marqués avec le numéro de lot, la marque (comme YG8, YT15) et les éléments de test, et le marquage ne doit pas affecter la zone de test.

6.4 Nettoyage des échantillons

Avant le test, nettoyez la surface de l'échantillon avec de l'éthanol anhydre pour éliminer l'huile, la poussière et utilisez-le après séchage.

7 étapes de test

7.1 Étalonnage de l'équipement

La machine d'essai universelle est calibrée à l'aide d'un capteur de force standard avec un écart de charge de $\leq \pm 0,5\%$.

Vérifiez la précision du montage, l'écart d'espacement des points de support est $\leq \pm 0,05$ mm.

7.2 Conditions d'essai

Température ambiante : 10°C à 35°C , $20 \pm 5^\circ\text{C}$ recommandé.

Humidité relative : 30% - 80% , $50 \pm 10\%$ recommandé.

Aucune vibration, aucun environnement de gaz corrosif.

7.3 Test de fonctionnement

Placez l'échantillon dans un dispositif de pliage à trois ou quatre points, en vous assurant que l'échantillon est de niveau.

Vitesse de chargement : $0,5$ mm/min ($\pm 0,05$ mm/min).

Charger lentement jusqu'à ce que l'échantillon se brise et enregistrer la charge de rupture maximale F_F (N).

Utilisez un pied à coulisse ou un micromètre pour mesurer la largeur de l'échantillon b et

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

l'épaisseur h h h (précision $\pm 0,02$ mm).

7.4 Calcul des résultats

Calculer la résistance à la rupture transversale en fonction du type d'essai :

Flexion trois points :

$$TRS = \frac{3FL}{2bh^2}$$

Flexion à quatre points :

$$TRS = \frac{3FL}{4bh^2} \times \frac{l_1}{l}$$

Prenez la valeur moyenne de 5 échantillons, avec un écart de $\leq \pm 5\%$.

8 Évaluation des résultats des tests

8.1 Plage de résistance à la rupture transversale

La résistance à la rupture transversale du carbure cémenté est généralement de 1 500 à 3 000 MPa, et la plage spécifique dépend de la nuance et de la teneur en Co :

YG6 (6% Co) : 2000-2400 MPa.

YG8 (8% Co) : 1800-2200 MPa.

YT15 (5% Co + TiC) : 1600-2000 MPa.

8.2 Évaluation des écarts

les 5 échantillons sont $\leq \pm 5\%$, sinon un nouveau test est nécessaire.

Si la valeur TRS dépasse les exigences techniques de la nuance, la cause doit être analysée (comme des défauts d'échantillon, une charge inégale).

8.3 Analyse des facteurs d'influence

Qualité de l'échantillon : une rugosité de surface $R_a > 0,2 \mu m$ ou un écaillage des bords entraîneront un faible TRS (écart $> 10\%$).

Vitesse de chargement : Les vitesses > 1 mm/min ou $< 0,1$ mm/min affecteront la charge de rupture (écart $\pm 5\%$).

Précision du montage : un écart de l'espacement des points d'appui $> 0,05$ mm ou une irrégularité entraînera une concentration de contraintes (écart $> 5\%$).

Microstructure : Une granulométrie WC inégale ($> \pm 0,2 \mu m$) ou une distribution de phase Co inégale peut entraîner des fluctuations TRS ($> \pm 6\%$).

9 Rapport de test

Le rapport de test doit inclure les éléments suivants :

Informations sur l'échantillon : marque, numéro de lot, taille, teneur en Co.

Conditions de test : modèle d'équipement, type de montage (trois points/quatre points), vitesse de chargement (0,5 mm/min), température ambiante (10°C à 35°C), humidité (30%-80%).

F de chaque spécimen F, largeur b b b, épaisseur h h, valeur TRS et valeur moyenne, écart.

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

Conclusion de l'évaluation : si elle répond aux exigences techniques de la marque.

Date du test et signature de l'opérateur.

Annexe A (Annexe informative) Valeurs de référence de la résistance à la rupture transversale des carbures cimentés typiques

Marque	Teneur en Co (% en poids)	Résistance à la rupture transversale (MPa)	Taille des grains (μm)	Applications typiques
YG6	6	2000-2400	0,8-1,2	Trépons de forage minier
YG8	8	1800-2200	0,8-1,2	Outils de coupe
YT15	5	1600-2000	0,6-1,0	Outils de finition

Annexe B (Annexe informative) Exigences relatives à l'environnement de test

Température : 10°C à 35°C, 20±5°C recommandé.

Humidité : 30%-80%, 50±10% recommandé.

Aucune vibration, aucun environnement de gaz corrosif.

Planéité du banc d'essai : écart < 0,02 mm/m.

Annexe C (Annexe informative) Comparaison de la flexion à trois et quatre points

paramètre	Flexion à trois points	Flexion à quatre points
Portée du support L L L	14,5 mm (± 0,05 mm)	20 mm (± 0,05 mm)
Espacement des points de chargement l l l l l l	-	10 mm (± 0,05 mm)
Répartition des contraintes	Concentrez-vous sur le point de chargement	Uniforme dans la plage de chargement
Champ d'application	Tests standards	Analyse des contraintes complexes

Résumer

La norme ISO 3327:2009 « Méthode d'essai de résistance à la compression du carbure cimenté » (en réalité , essai de résistance à la rupture transversale) fournit une procédure normalisée pour l'essai de résistance à la rupture transversale du carbure cimenté et garantit l'exactitude et la répétabilité des résultats d'essai grâce à une préparation d'éprouvettes, des étapes d'essai et une évaluation normalisées. La mise en œuvre de cette norme facilite le contrôle qualité et l'évaluation des performances du carbure cimenté, et offre un support technique fiable pour des applications telles que les outils de coupe, les forets miniers et les moules.

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

Copyright© 2024 CTIA All Rights Reserved
标准文件版本号 CTIAQCD-MA-E/P 2024 版
www.ctia.com.cn

电话/TEL: 0086 592 512 9696
CTIAQCD-MA-E/P 2018-2024V
sales@chinatungsten.com

appendice:

ISO 28080:2021

Méthode d'essai d'usure du carbure cimenté

Métaux durs — Essais d'abrasion pour les métaux durs

1 Portée

Cette norme spécifie une méthode d'essai générale pour déterminer les caractéristiques d'usure du carbure cimenté. Cet essai est adapté aux environnements de laboratoire où les dommages dus à l'usure doivent être simulés. La procédure d'essai comprend des informations d'essai dans différentes conditions :

a) utilisation de meules opposées de rigidités différentes (telles que des meules en acier ou en caoutchouc) ; b) essais en milieu humide et à sec ; c) abrasifs de granulométries différentes ; d) environnements chimiques différents. Cette norme s'applique aux carbures cimentés dont la phase dure principale est le carbure de tungstène (WC) et la phase de liaison au cobalt (Co), ainsi qu'aux carbures cimentés additionnés d'autres carbures (tels que le TaC , TiC , VC). Cette norme ne s'applique pas aux carbures cimentés revêtus ni aux carbures cimentés après renforcement de surface (tel que l'essai d'usure de la couche cimentée).

2 Références normatives

Les articles des documents suivants deviennent des articles de la présente norme par référence. Pour les documents référencés datés, seule la version référencée est applicable. Pour les documents référencés non datés, la dernière version (y compris tous les amendements) s'applique à la présente norme.

ISO 3878:1983 Carbure cimenté — Essai de dureté Vickers

ISO 3611:2010 Carbure cimenté — Terminologie

Méthode d'essai standard ASTM G65-04(2010) - Essai d'abrasion sur sable sec et roue en caoutchouc

Méthode d'essai standard ASTM B611-13 pour la résistance à l'usure sous haute contrainte des matériaux durs

Méthode d'essai standard ASTM G105-02(2013) - Essai d'abrasion sur sable humide/roue en caoutchouc

3 Termes et définitions

Cette norme adopte la norme ISO 3611:2010 et les termes et définitions suivants :

Métaux durs : Matériau composite composé de carbure de tungstène (WC) comme phase dure principale et de cobalt (Co) comme phase de liaison par le biais d'un procédé de métallurgie des poudres.

Abrasion : Perte de matière causée par le glissement relatif de particules dures ou de surfaces rugueuses.

Taux d'usure : Volume ou masse de matériau perdu par unité de temps ou par unité de distance de glissement, exprimé en mm³/m ou mg/m.

Contreface Roue : La roue qui entre en contact avec l'échantillon et produit un mouvement relatif,

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

qui peut être en acier ou en caoutchouc.

Abrasif : Particules dures telles que le sable de quartz ou l'oxyde d'aluminium utilisées pour simuler l'usure.

4 Principe du test

L'essai d'usure consiste à mettre l'éprouvette en carbure en contact avec la meule opposée dans des conditions spécifiques, à appliquer une charge et une distance de glissement déterminées, à utiliser des abrasifs (tels que du sable sec ou humide) pour simuler l'environnement d'usure, à mesurer la perte de masse ou de volume de l'éprouvette et à calculer le taux d'usure. Cette méthode d'essai se réfère aux normes ASTM G65 (sable sec/meule en caoutchouc), ASTM B611 (usure sous forte contrainte) et ASTM G105 (sable humide/meule en caoutchouc) et les complète, et s'applique à différentes conditions d'usure.

5 Équipements de test

5.1 Testeur d'usure

Dispositif d'essai d'usure avec charge réglable, plage de charge 5-130 N, précision $\pm 0,5$ N.

Vitesse de glissement : 0,1-1 m/s, écart $< \pm 0,05$ m/s.

Distance de glissement : réglable jusqu'à 1000 m, précision ± 1 m.

5.2 Roues opposées

Roue en acier : dureté HRC 55-60, diamètre 228 mm (± 1 mm), largeur 12,7 mm ($\pm 0,1$ mm).

Roue en caoutchouc : dureté Shore A 60-65, diamètre 228 mm (± 1 mm), largeur 12,7 mm ($\pm 0,1$ mm).

5.3 Système d'alimentation en abrasif

Abrasif : Sable de quartz (granulométrie 200-300 μ m) ou oxyde d'aluminium (granulométrie 100-200 μ m) , pureté > 98 %.

Débit d'alimentation : 250-300 g/min, écart $< \pm 5$ g/min (sec).

Test humide : suspension à base d'eau, concentration abrasive 10-20 % en poids .

5.4 Outils de mesure

Balance de précision : précision $\pm 0,1$ mg.

Pied à coulisse : précision $\pm 0,02$ mm.

Profileur de surface : mesure la profondeur d'usure avec une précision de $\pm 0,001$ mm.

5.5 Contrôle environnemental

Température : 10°C à 35°C, 20 $\pm$ 5°C recommandé.

Humidité : 30%-80%, 50 $\pm$ 10% recommandé.

Environnements chimiques contrôlés (tels que des solutions acides ou alcalines).

6. Préparation des échantillons

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

6.1 Exigences relatives à l'échantillon

Forme de l'échantillon : cuboïde, dimensions $76 \times 25,4 \times 6,35$ mm ($\pm 0,1$ mm), ou ajustée selon le protocole.

La surface d'essai doit être plane et exempte de fissures, de couches d'oxyde ou de défauts d'usinage. Rugosité de surface $Ra < 0,2$ μ m (polie).

6.2 Nombre d'échantillons

Le nombre d'échantillons dans chaque lot ne doit pas être inférieur à 3 pour garantir la représentativité statistique.

Si l'écart de résultat est important ($> 10\%$), le nombre d'échantillons doit être augmenté à 5.

6.3 Exemple de marquage

Les échantillons doivent être marqués avec le numéro de lot, la marque (comme YG8, YT15) et les éléments de test, et le marquage ne doit pas affecter la zone de test.

6.4 Nettoyage des échantillons

Avant le test, nettoyez la surface de l'échantillon avec de l'éthanol anhydre pour éliminer l'huile, la poussière et utilisez-le après séchage.

Après le test, un nettoyeur à ultrasons (40 kHz, 5 min) a été utilisé pour éliminer l'abrasif résiduel.

6.5 Mesure initiale

Mesurer la masse initiale (précision $\pm 0,1$ mg) et l'épaisseur (précision $\pm 0,02$ mm) de l'échantillon.

7 étapes de test

7.1 Étalonnage de l'équipement

Le testeur est étalonné à l'aide d'une charge standard avec un écart de $< \pm 0,5$ N.

Vérifiez l'état des roues opposées pour vous assurer qu'il n'y a pas d'usure ou de contamination sur la surface.

7.2 Conditions d'essai

Température ambiante : 10°C à 35°C , $20 \pm 5^{\circ}\text{C}$ recommandé.

Humidité relative : 30%-80%, $50 \pm 10\%$ recommandé.

Environnement chimique : Sélectionner selon le protocole (par exemple, eau déionisée, HCl à 1 %).

7.3 Test de fonctionnement

Montez l'échantillon sur le testeur, mettez-le en contact avec la roue opposée et appliquez une charge (45 N sont recommandés).

Sélectionnez les conditions de test :

Type sec : utilisant une roue en acier, alimentation en sable de quartz 250 g/min, distance de glissement 4300 m.

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

Type humide : utilisation de roues en caoutchouc, alimentation par suspension de sable humide, distance de glissement 4300 m.

Démarrez le testeur et enregistrez la distance de glissement et l'usure de l'échantillon.

Chaque échantillon a été testé une fois et répété 3 à 5 fois pour garantir la stabilité des résultats.

7.4 Mesure des résultats

Après les tests, les échantillons ont été nettoyés, séchés et la masse finale a été mesurée (précision $\pm 0,1$ mg).

La profondeur d'usure a été mesurée à l'aide d'un profilomètre de surface (précision $\pm 0,001$ mm).

Calculer la perte de masse : $\Delta m = m_0 - m_1$ (m_0 est la masse initiale, m_1 est la masse finale).

7.5 Calcul du taux d'usure

Taux d'usure :

$$W = \frac{\Delta m}{L}$$

dans:

W est le taux d'usure, en mg/m ;

Δm est la perte de masse, en mg ;

L est la distance de glissement en mètres.

Ou calculer le taux d'usure du volume (besoin de combiner la densité) :

$$V = \frac{\Delta m}{\rho \cdot L}$$

dans:

V est le taux d'usure volumique, en mm³/m ;

ρ est la densité du matériau en g/cm³.

8 Évaluation des résultats des tests

8.1 Plage de taux d'usure

Les taux d'usure du carbure varient en fonction des conditions d'essai et de la nuance :

YG6 (6 % Co) : sec 0,5-1,0 mg/m, humide 0,3-0,7 mg/m.

YG8 (8% Co) : type sec 0,7-1,2 mg/m³, type humide 0,5-0,9 mg/m³.

YT15 (5% Co + TiC) : sec 0,4-0,8 mg/m, humide 0,2-0,6 mg/m.

8.2 Évaluation des écarts

de 3 à 5 échantillons est $\leq \pm 10$ %, sinon un nouveau test est nécessaire.

Si le taux d'usure dépasse la plage prévue, la cause doit être analysée (comme une taille de particules abrasives inégale et des défauts de surface de l'échantillon).

8.3 Analyse des facteurs d'influence

Rigidité des roues opposées : Le taux d'usure des roues en acier est plus élevé que celui des roues

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

en caoutchouc (écart > 20%).

Taille des particules abrasives : Les tailles de particules > 300 µm augmentent le taux d'usure (écart > 15 %).

Environnement chimique : Les environnements acides (tels que 1 % HCl) accéléreront l'usure corrosive (écart > 30 %).

Charge : Des charges > 130 N peuvent provoquer une fissuration de l'échantillon et affecter les résultats.

9 Rapport de test

Le rapport de test doit inclure les éléments suivants :

Informations sur l'échantillon : marque, numéro de lot, taille, teneur en Co.

Conditions d'essai : modèle d'équipement, type de roue opposée (acier/caoutchouc), charge (N), distance de glissement (m), type d'abrasif et taille des particules, environnement (humide/sec/chimique).

Résultats des tests : masse initiale, masse finale, perte de masse, taux d'usure, profondeur d'usure et valeur moyenne, écart.

Conclusion de l'évaluation : si elle correspond à la fourchette attendue.

Date du test et signature de l'opérateur.

Annexe A (Annexe informative) Valeurs de référence typiques du taux d'usure du carbure

Marque	Teneur en Co (% en poids)	Taux d'usure à sec (mg/m)	Taux d'usure humide (mg/m)	Applications typiques
YG6	6	0,5-1,0	0,3-0,7	Trépans de forage minier
YG8	8	0,7-1,2	0,5-0,9	Outils de coupe
YT15	5	0,4-0,8	0,2-0,6	Outils de finition

Annexe B (Annexe informative) Exigences relatives à l'environnement de test

Température : 10°C à 35°C, 20±5°C recommandé.

Humidité : 30%-80%, 50±10% recommandé.

Aucune vibration, aucun environnement de gaz corrosif (sauf test d'environnements chimiques spécifiques).

Planéité du banc d'essai : écart < 0,02 mm/m.

Annexe C (Annexe informative) Exemples de conditions d'essai d'usure

Type de test	Roue opposée	Charge (N)	Distance de glissement (m)	Abrasif	environnement
Sec	Roues en acier	45	4300	Sable de quartz 250 µm	Air
Mouillé	roue en	45	4300	Sable humide 200	eau

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

Type de test	de Roue opposée	Charge (N)	Distance de glissement (m)	Abrasif	environnement
	caoutchouc			µm	
Chimique	Roues en acier	45	2000	Sable de quartz 250 µm	1% HCl

appendice:

Méthode d'essai standard ASTM B611-13

— Haute résistance à l'usure sous contrainte pour les matériaux durs

1 Portée

1.1 Cette méthode d'essai normalisée est destinée à tester la résistance à l'usure sous forte contrainte des matériaux durs, principalement le carbure, mais s'applique également aux céramiques, aux cermets et aux revêtements durs à base de métal d'une dureté supérieure à 55 HRC. Cette méthode simule des conditions d'usure sous forte contrainte, dans lesquelles les particules abrasives se fracturent, en utilisant une meule en acier pour forcer l'abrasif à entrer en contact avec l'échantillon, contrairement aux essais d'usure sous faible contrainte utilisant des meules en caoutchouc (comme les méthodes G65, G105 et G75).

1.2 Cette méthode d'essai utilise une boue aqueuse contenant des particules d'oxyde d'aluminium comme milieu abrasif et force l'abrasif sur la surface plane de l'échantillon au moyen d'une roue en acier rotative en contact linéaire avec la roue rotative qui est immergée dans la boue.

1.3 Lorsque les unités sont données au format pouce-livre, les unités SI sont référencées et les équivalents approximatifs sont donnés entre parenthèses.

1.4 Cette norme ne prétend pas couvrir toutes les questions de sécurité. Il incombe au testeur d'établir des pratiques de sécurité et de santé adaptées à chaque situation spécifique et d'évaluer l'applicabilité des limitations réglementaires.

1.5 La présente norme internationale a été élaborée conformément aux principes régissant l'élaboration des normes, lignes directrices et recommandations internationales du Comité des obstacles techniques au commerce de l'Organisation mondiale du commerce.

2 Importance et utilisation

2.1 L'extraction de minéraux de la croûte terrestre nécessite généralement l'utilisation d'outils métalliques pour briser la roche. Ces outils sont souvent recouverts, plaqués ou revêtus de matériaux durs tels que le carbure. Le forage, la rupture et le déplacement de la roche provoquent une usure sous forte contrainte au contact de la surface de l'outil avec la roche, avec une pression suffisante pour la briser. Cette méthode d'essai simule ces conditions et permet de sélectionner de nouveaux matériaux pour de telles applications. Elle peut également servir d'outil de contrôle qualité pour les applications à forte usure sous forte contrainte, telles que les pompes à boues, les équipements de concassage, les broyeurs de recyclage, les équipements de démolition, etc.

2.2 La plupart des essais d'usure utilisent une usure à faible contrainte, où l'abrasif reste relativement intact pendant l'essai. L'usure à forte contrainte simule un scénario d'application où les forces entre l'abrasif et l'outil/la pièce sont suffisamment importantes pour écraser l'abrasif.

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

3 Termes et définitions

Usure sous forte contrainte : Type d'usure dans lequel l'abrasif se brise sous une force suffisante, provoquée par la meule en acier qui force le contact avec l'échantillon.

Usure à faible contrainte : type d'usure dans lequel l'abrasif reste relativement intact pendant le test, généralement causé par des roues en caoutchouc.

Résistance à l'usure : Capacité d'un matériau à résister à l'usure, exprimée en volume d'usure ou en perte de masse.

4 Équipements d'essai

4.1 Dispositif d'essai d'usure

Il est constitué d'une roue en acier rotative (228,6 mm de diamètre, 12,7 mm de largeur) qui tourne à 200 ± 10 tr/min.

Le matériau de la roue en acier est en acier trempé avec une dureté ≥ 60 HRC.

4.2 Abrasif

d' alumine (Al_2O_3) d'une granulométrie de 200 à 280 mesh ont été utilisées pour préparer une suspension aqueuse d'une concentration volumique de 60 %.

4.3 Dispositif de fixation de l'échantillon

contact linéaire avec la roue en acier et la force de charge est de 250 ± 5 N.

4.4 Contrôle environnemental

Température : $15^{\circ}C$ à $35^{\circ}C$, $23 \pm 2^{\circ}C$ recommandé.

Humidité : 30% à 70%, $50 \pm 10\%$ recommandé.

Aucune vibration, aucun environnement de gaz corrosif.

5. Exigences relatives à l'échantillon

5.1 Matériaux

Revêtements durs à base de carbure, de céramique, de cermet ou de métal avec une dureté > 55 HRC.

5.2 Dimensions

Taille de l'échantillon : $50,8 \text{ mm} \times 25,4 \text{ mm} \times 6,35 \text{ mm}$ (longueur $\times$ largeur $\times$ hauteur), tolérance $\pm 0,1 \text{ mm}$.

La surface est lisse, avec une rugosité de $Ra \leq 0,2 \mu m$.

5.3 Préparation de la surface

Utilisez du papier de verre diamanté de 600# à 1200# pour le meulage et du liquide de polissage à l'oxyde d'aluminium de $0,25 \mu m$ pour le polissage.

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

5.4 Nombre d'échantillons

trois échantillons de chaque matériau ont été utilisés pour l'analyse statistique.

6 Procédures de test

6.1 Préparation de l'équipement

Vérifiez la surface de la roue en acier pour détecter toute usure ou fissure évidente et remplacez-la si nécessaire.

Ajustez les pinces de l'échantillon pour vous assurer que la force de chargement est de 250 ± 5 N.

6.2 Test de fonctionnement

L'échantillon est fixé dans le dispositif en contact linéaire avec la roue en acier.

Ajouter 200 ml de suspension d'alumine à l'appareil d'essai.

Faites tourner la roue en acier à 200 ± 10 tr/min pendant 600 tours (environ 3 minutes).

Après le test, retirez l'échantillon, nettoyez-le avec de l'éthanol anhydre et séchez-le.

6.3 Mesure

La perte de masse des échantillons a été mesurée à l'aide d'une balance de précision (précision $\pm 0,001$ g).

Enregistrez la masse initiale m_1 et la masse finale m_2 , et calculez la perte de masse $\Delta m = m_1 - m_2$.

6.4 Répétabilité

Répétez le test deux fois pour chaque échantillon et prenez la valeur moyenne.

7 Calcul du résultat

7.1 Taux d'usure

Le taux d'usure est exprimé en perte de masse (g) ou en perte de volume (mm^3).

La perte de volume peut être calculée en divisant la perte de masse par la densité du matériau :

$$V = \frac{\Delta m}{\rho}$$

où ρ est la masse volumique du matériau (g/cm^3).

7.2 Résistance relative à l'usure

La perte de masse de l'échantillon est comparée à la perte de masse d'un matériau de référence (tel que le carbure cémenté standard) et la résistance à l'usure relative est calculée.

7.3 Évaluation des résultats

Assurez-vous que l'écart de perte de masse moyen des trois échantillons est $\leq \pm 5\%$, sinon un nouveau test est nécessaire.

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

8 facteurs d'influence

8.1 Taille des particules abrasives : un écart de taille des particules de 200 à 280 mesh peut entraîner un écart de 5 à 10 % dans les résultats.

8.2 Force de chargement : Un écart de force de 250 ± 5 N peut affecter le taux d'usure de 3 à 5 %.

8.3 État de la roue en acier : l'usure de la surface de la roue peut augmenter l'erreur de test de 2 à 4 %.

9 Rapport de test

Le rapport de test doit inclure les éléments suivants :

Informations sur l'échantillon : type de matériau, dureté, taille.

Conditions d'essai : vitesse de la meule, force de chargement, type d'abrasif, température ambiante (15°C à 35°C), humidité (30%-70%).

Résultats des tests : masse initiale, masse finale, perte de masse, moyenne et écart.

Résistance relative à l'usure (le cas échéant).

Date du test et signature de l'opérateur.

Annexe A (Annexe informative) Valeurs de référence typiques d'usure des matériaux

Type de matériau	Dureté (HRC)	Perte de masse (g)	Applications typiques
cémenté (YG6)	88	0,02-0,05	Trépans de forage minier
céramique	75	0,05-0,10	Revêtement résistant à l'usure
Revêtement à base de métal	60	0,10-0,15	Équipement de concassage

Annexe B (Annexe informative) Exigences environnementales

Température : 15°C à 35°C , $23 \pm 2^{\circ}\text{C}$ recommandé.

Humidité : 30%-70%, $50 \pm 10\%$ recommandé.

Aucune vibration, aucun environnement de gaz corrosif.

Planéité du banc d'essai : écart $< 0,02$ mm/m.

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

appendice:

ASTM E23-18

Méthode d'essai d'impact sur éprouvette entaillée

Méthodes d'essai standard pour les essais d'impact sur barres entaillées de matériaux métalliques

1 Portée

Cette norme spécifie la méthode de détermination de l'énergie d'absorption d'impact d'éprouvettes entaillées par essais de choc Charpy ou Izod à température ambiante (10°C à 35°C) ou à basse température (-196°C à 0°C) pour les matériaux métalliques, y compris les principes d'essai, les exigences relatives à l'équipement, la préparation des éprouvettes, les étapes d'essai, le calcul et l'évaluation des résultats, le rapport d'essai, etc. Cette norme s'applique aux matériaux métalliques avec différents types d'entailles (tels que l'acier, le carbure cémenté, l'alliage de titane, etc.), mais pas aux matériaux non métalliques ou aux environnements dont les températures dépassent 35°C.

2 Références normatives

Les clauses des documents suivants deviennent des clauses de la présente norme par référence. Pour les documents référencés datés, seule la version référencée est applicable. Pour les documents référencés non datés, la dernière version (y compris toutes les révisions) s'applique à la présente norme.

Norme ASTM E4-21 pour l'étalonnage des machines d'essai de force, de compression et de déformation

Méthode d'essai standard ASTM E23-16c pour les essais d'impact sur éprouvettes entaillées (référence de la version historique)

ISO 148-1:2016 Matériaux métalliques — Essai de choc Charpy au pendule Partie 1 : Méthode d'essai

Méthode d'essai standard ASTM E2298-19 - Essai d'impact instrumenté

3 Termes et définitions

Cette norme adopte la norme ASTM E23-18 et les termes et définitions suivants :

Énergie d'impact : L'énergie absorbée par l'échantillon entaillé lors de l'essai d'impact, mesurée en joules (J), reflète la ténacité à l'impact du matériau.

Essai Charpy : essai qui utilise un échantillon de poutre en porte-à-faux pour mesurer l'absorption d'énergie par impact de pendule.

Essai Izod : essai permettant de déterminer l'absorption d'énergie par impact de pendule à l'aide d'un échantillon de poutre à support unique.

Type d'encoche : Les formes d'encoche préfabriquées sur l'échantillon comprennent l'encoche en V (2 mm de profondeur, angle de 45°, rayon de racine de 0,25 mm) et l'encoche en U (5 mm de profondeur, rayon de racine de 1 mm).

4 Principe du test

L'essai d'impact consiste à projeter un pendule d'une hauteur spécifiée sur un échantillon métallique

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

Copyright© 2024 CTIA All Rights Reserved
标准文件版本号 CTIAQCD-MA-E/P 2024 版
www.ctia.com.cn

电话/TEL: 0086 592 512 9696
CTIAQCD-MA-E/P 2018-2024V
sales@chinatungsten.com

pré-entaillé. L'énergie cinétique résiduelle (ou perte d'énergie) après la rupture de l'échantillon par le pendule est mesurée et l'énergie d'impact absorbée par l'échantillon est calculée. Cette énergie reflète la ténacité et le comportement à la rupture du matériau sous charge à grande vitesse. L'essai est applicable aux configurations Charpy ou Izod, et sa formule spécifique est :

$$E = mgh - mgh'$$

dans:

E est l'énergie d'absorption d'impact, en J ;

m est la masse du pendule, en kg ;

g est l'accélération due à la gravité, environ 9,81 m/s² ;

h est la hauteur initiale, en mètres ;

h' est la hauteur restante après fracture, en mètres (généralement mesurée indirectement par l'angle du pendule).

5 Équipements de test

5.1 Machine d'essai d'impact

Testeur d'impact à pendule avec plage d'énergie de 150 J à 750 J, précision de ± 1 J, calibré selon ASTM E4-21.

Hauteur de déclenchement du pendule : réglable, angle initial 150°.

5.2 Dispositif de fixation d'échantillon

Dispositif Charpy : portée du support 40 mm ($\pm 0,05$ mm), planéité de la surface du support $< 0,01$ mm.

Pince Izod : support simple, hauteur 28 mm ($\pm 0,05$ mm), force de serrage uniforme.

5.3 Outils de mesure

Pied à coulisse : précision $\pm 0,02$ mm, utilisé pour mesurer la taille de l'échantillon.

Appareil de mesure d'angle : précision $\pm 0,1^\circ$, utilisé pour calibrer la position du pendule.

5.4 Équipement cryogénique (facultatif)

Glacière à azote liquide ou glace sèche, plage de température -196°C à 0°C, précision $\pm 2^\circ\text{C}$.

5.5 Contrôle environnemental

Température : 10°C à 35°C (température ambiante), ou -196°C à 0°C (température froide), 20 $\pm$ 5°C recommandés.

Humidité : 30%-80%, 50 $\pm$ 10% recommandé.

Aucune vibration, aucun environnement de gaz corrosif.

6. Préparation des échantillons

6.1 Type d'échantillon

Spécimen Charpy : taille 55 $\times$ 10 $\times$ 10 mm ($\pm 0,1$ mm), encoche au centre.

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

Échantillon Izod : Dimensions : $75 \times 10 \times 10$ mm ($\pm 0,1$ mm), encoche située à 28 mm d'une extrémité.

6.2 Préparation des espaces

Entaille en V : profondeur 2 mm ($\pm 0,025$ mm), angle 45° ($\pm 0,5^\circ$), rayon de racine 0,25 mm ($\pm 0,025$ mm).

Entaille en U : profondeur 5 mm ($\pm 0,025$ mm), rayon de racine 1 mm ($\pm 0,025$ mm).

La surface de l'encoche est lisse et sans bavures, préparée par découpe au fil ou par fraisage.

6.3 Exigences relatives à l'échantillon

La surface de l'échantillon est lisse, sans fissures, couche d'oxyde ou défauts de traitement.

Rugosité de surface $R_a < 0,2 \mu\text{m}$ (polie).

Les bords des échantillons ont été chanfreinés de $0,1 \times 45^\circ$ pour réduire la concentration de contraintes.

6.4 Nombre d'échantillons

Le nombre d'échantillons dans chaque lot ne doit pas être inférieur à 3 pour garantir la représentativité statistique.

Si l'écart de résultat est important (> 10 J), le nombre d'échantillons doit être augmenté à 5.

6.5 Nettoyage des échantillons

Avant le test, nettoyez la surface de l'échantillon avec de l'éthanol anhydre pour éliminer l'huile, la poussière et utilisez-le après séchage.

6.6 Exemple de marquage

Les échantillons doivent être marqués avec le numéro de lot, la nuance (comme l'acier YG8, 1045) et les éléments de test, et le marquage ne doit pas affecter la zone de test.

6.7 Traitement à basse température (facultatif)

Placez l'échantillon dans une boîte de refroidissement et maintenez la température spécifiée pendant 15 à 30 minutes pour assurer un refroidissement uniforme.

7 étapes de test

7.1 Étalonnage de l'équipement

Le testeur d'impact est étalonné à l'aide d'un pendule standard avec une déviation d'énergie de $< \pm 1$ J.

Vérifiez les dimensions du dispositif et de l'encoche, l'écart est $\leq \pm 0,025$ mm.

7.2 Conditions d'essai

Température ambiante : 10°C à 35°C (température ambiante), ou -196°C à 0°C (basse température), $20 \pm 5^\circ\text{C}$ sont recommandés.

Humidité relative : 30%-80%, $50 \pm 10\%$ recommandé.

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

Aucune vibration, aucun environnement de gaz corrosif.

7.3 Test de fonctionnement

Montez l'échantillon dans le dispositif (configuration Charpy ou Izzy) en vous assurant que l'encoche est orientée dans la direction de l'impact du pendule.

Relâchez le pendule et enregistrez l'énergie d'impact $E E E$ (J).

Chaque échantillon a été testé une fois et répété 3 à 5 fois pour garantir la stabilité des résultats.

Si des essais à basse température sont effectués, l'échantillon doit être testé immédiatement (< 5 s) après avoir été sorti de la boîte de refroidissement.

7.4 Observation de la surface de fracture (facultatif)

Les surfaces de fracture ont été observées à l'aide d'un microscope optique (grossissement $50\times$) et le type de fracture (fragile ou ductile) a été enregistré.

8 Évaluation des résultats des tests

8.1 Plage d'énergie d'absorption d'impact

Plage d'énergie d'absorption d'impact des matériaux métalliques : 5-200 J, la valeur spécifique dépend du matériau et de la température :

Carbure cémenté (YG8, température ambiante) : 10-20 J.

Acier trempé (1045, température ambiante) : 50-80 J.

Alliage d'aluminium (6061-T6, température ambiante) : 20-40 J.

À basse température (-40°C), l'énergie est généralement réduite de 20 à 50 %.

8.2 Évaluation des écarts

de 3 à 5 échantillons est $\leq \pm 10$ J, sinon un nouveau test est nécessaire.

Si la valeur énergétique dépasse les exigences techniques du matériau, les raisons (telles que la qualité de l'encoche, les défauts de l'échantillon) doivent être analysées.

8.3 Analyse des facteurs d'influence

Qualité de l'encoche : une erreur de rayon de racine d'encoche $> 0,025$ mm ou une rugosité de surface $> 0,2$ μm réduira l'énergie (écart > 15 %).

Température : Une diminution de température de $> 20^{\circ}\text{C}$ réduira considérablement l'énergie (écart > 30 %).

Vitesse de chargement : Un écart de la vitesse du pendule $> 0,05$ m/s affectera les résultats (écart ± 5 %).

Microstructure : Une granulométrie inégale ($> \pm 0,2$ μm) ou une porosité élevée réduira la ténacité (écart > 10 %).

9 Rapport de test

Le rapport de test doit inclure les éléments suivants :

Informations sur l'échantillon : type de matériau, marque, numéro de lot, taille, type d'encoche (V/U).

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

Conditions d'essai : modèle d'équipement, type de montage (Charpy/Izod), température d'essai (°C), humidité ambiante (30%-80%).

Résultats des tests : Énergie d'absorption d'impact E E de chaque échantillon E (J), valeur moyenne et écart, type de fracture (si observée).

Conclusion de l'évaluation : si le matériel répond aux exigences techniques.

Date du test et signature de l'opérateur.

Annexe A (Annexe informative) Valeurs de référence de l'énergie d'impact des matériaux métalliques typiques

Type de matériau	Marque/catégorie	Énergie d'impact (J, température ambiante)	Énergie d'impact (J, -40°C)	Applications typiques
carbure cémenté	YG8	10-20	5-10	Outils de coupe
Acier trempé	1045 (HRC 30)	50-80	20-40	Pièces mécaniques
alliage d'aluminium	6061-T6	20-40	10-20	Structures aérospatiales

Annexe B (Annexe informative) Exigences relatives à l'environnement de test

Température : 10°C à 35°C (température ambiante), ou -196°C à 0°C (température froide), 20±5°C recommandés.

Humidité : 30%-80%, 50±10% recommandé.

Aucune vibration, aucun environnement de gaz corrosif.

Planéité du banc d'essai : écart < 0,02 mm/m.

Annexe C (Annexe informative) Relation entre la taille de l'espace et l'énergie

Type d'écart	Profondeur (mm)	Angle (°)	Rayon de la racine (mm)	Impact énergétique (%)
type V	2	45	0,25	Repères
en forme de U	5	0	1.0	Augmentation de 10 à 20 %

Résumer

La norme ASTM E23-18 « Méthode d'essai de résistance aux chocs sur éprouvettes entaillées » fournit une procédure normalisée pour l'essai de ténacité aux chocs des matériaux métalliques. Elle garantit la précision et la répétabilité des résultats grâce à une préparation des éprouvettes, des étapes d'essai et une évaluation normalisées. La mise en œuvre de cette norme permet d'évaluer la résistance aux chocs des matériaux métalliques (tels que le carbure cémenté et l'acier) et offre un support technique fiable pour des domaines d'application tels que la fabrication de machines, la construction et l'énergie.

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

appendice:

ASTM G65-16

Méthode d'essai d'usure des roues en sable sec/caoutchouc

Méthode d'essai standard pour mesurer l'abrasion à l'aide

l'appareil à roue sèche en sable/caoutchouc

1 Portée

Cette norme spécifie la méthode de laboratoire pour mesurer la résistance à l'usure par rayure des matériaux métalliques par essai sur sable sec/roue en caoutchouc. Elle inclut les principes d'essai, les exigences en matière d'équipement, la préparation des échantillons, les étapes d'essai, le calcul et l'évaluation des résultats, le rapport d'essai, etc. Elle s'applique aux essais de résistance à l'usure des matériaux métalliques (carbure cimenté, acier, alliage, etc.) et vise à générer des données reproductibles de classement de la résistance à l'usure par rayure des matériaux dans des conditions spécifiques. Elle ne s'applique pas aux matériaux non métalliques ni ne tente de simuler intégralement les conditions de travail réelles (comme les environnements corrosifs ou les conditions d'impact).

2 Références normatives

Les clauses des documents suivants deviennent des clauses de la présente norme par référence. Pour les documents référencés datés, seule la version référencée est applicable. Pour les documents référencés non datés, la dernière version (y compris toutes les révisions) s'applique à la présente norme.

Norme ASTM E4-21 pour l'étalonnage des machines d'essai de force, de compression et de déformation

Méthode d'essai standard ASTM G105-02(2013) - Essai d'abrasion sur sable humide/roue en caoutchouc

Méthode d'essai standard ASTM B611-13 pour la résistance à l'usure sous contrainte élevée des carbures cimentés

3 Termes et définitions

Cette norme adopte la norme ASTM G65-16 et les termes et définitions suivants :

Abrasion par rayure : Perte de matière causée par le glissement relatif de particules dures sur la surface du matériau sous une certaine pression.

Perte de volume : volume de matière perdu par l'échantillon après l'essai d'usure, en millimètres cubes (mm^3) .

Taux d'usure : Volume de matière perdu par unité de distance de glissement, exprimé en mm^3/m .

Contreface Roue : Roue en caoutchouc qui entre en contact avec l'échantillon et produit un mouvement relatif, avec une dureté de Shore A 60-65 .

Abrasif : Particules dures utilisées pour simuler l'usure, qui dans cette norme fait référence au sable sec (tel que le sable de quartz).

4 Principe du test

L'essai d'usure sur roue en caoutchouc/sable sec évalue la résistance à l'usure du matériau en mettant

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

l'échantillon métallique en contact avec une roue en caoutchouc en rotation dans un environnement abrasif de sable sec, en appliquant une charge et une distance de glissement déterminées, et en mesurant la perte de masse ou de volume de l'échantillon due à l'usure par rayure. Les conditions d'essai sont normalisées pour garantir la répétabilité des résultats, et ceux-ci sont exprimés en perte de volume (mm^3). Les matériaux présentant une résistance à l'usure élevée présentent une perte de volume plus faible.

5 Équipements de test

5.1 Testeur d'usure

Dispositif de roue à sable sec/caoutchouc avec charge réglable, plage de charge 5-130 N, précision $\pm 0,5$ N.

Vitesse de glissement : 0,1-1 m/s, écart $< \pm 0,05$ m/s.

Distance de glissement : réglable jusqu'à 4300 m, précision ± 1 m.

5.2 Roue en caoutchouc

Dureté : Shore A 60-65.

Diamètre : 228 mm (± 1 mm), largeur 12,7 mm ($\pm 0,1$ mm).

La surface est exempte de défauts et doit être remplacée régulièrement pour assurer la cohérence.

5.3 Système d'alimentation en abrasif

Abrasif : sable de quartz sec, granulométrie 200-300 μm , pureté $> 98\%$.

Débit d'alimentation : 250-300 g/min, écart $< \pm 5$ g/min.

Le flux de sable est réparti uniformément grâce à une buse à géométrie standard (largeur 1 mm).

5.4 Outils de mesure

Balance de précision : précision $\pm 0,1$ mg.

Pied à coulisse : précision $\pm 0,02$ mm.

Profilleur de surface : mesure la profondeur d'usure avec une précision de $\pm 0,001$ mm.

5.5 Contrôle environnemental

Température : 10°C à 35°C , $20 \pm 5^\circ\text{C}$ recommandé.

Humidité : 30%-80%, $50 \pm 10\%$ recommandé.

Aucune vibration, aucun environnement de gaz corrosif.

6. Préparation des échantillons

6.1 Exigences relatives à l'échantillon

Forme de l'échantillon : cuboïde, dimensions $76 \times 25,4 \times 6,35$ mm ($\pm 0,1$ mm), ou ajustée selon le protocole.

La surface d'essai doit être plane et exempte de fissures, de couches d'oxyde ou de défauts d'usinage.

Rugosité de surface $R_a < 0,2 \mu\text{m}$ (polie).

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

6.2 Nombre d'échantillons

Le nombre d'échantillons dans chaque lot ne doit pas être inférieur à 3 pour garantir la représentativité statistique.

Si l'écart de résultat est important ($> 10\%$), le nombre d'échantillons doit être augmenté à 5.

6.3 Exemple de marquage

Les échantillons doivent être marqués avec le numéro de lot, la nuance (comme l'acier YG8, AISI 1020) et l'élément d'essai, et le marquage ne doit pas affecter la zone d'essai.

6.4 Nettoyage des échantillons

Avant le test, nettoyez la surface de l'échantillon avec de l'éthanol anhydre pour éliminer l'huile, la poussière et utilisez-le après séchage.

Après le test, un nettoyeur à ultrasons (40 kHz, 5 min) a été utilisé pour éliminer l'abrasif résiduel.

6.5 Mesure initiale

Mesurer la masse initiale (précision $\pm 0,1$ mg) et l'épaisseur (précision $\pm 0,02$ mm) de l'échantillon.

7 étapes de test

7.1 Étalonnage de l'équipement

Le testeur est étalonné à l'aide d'une charge standard avec un écart de $< \pm 0,5$ N.

Vérifiez l'état de la roue en caoutchouc pour vous assurer que la surface n'est pas usée ou contaminée.

7.2 Conditions d'essai

Température ambiante : 10°C à 35°C , $20 \pm 5^{\circ}\text{C}$ recommandé.

Humidité relative : 30% - 80% , $50 \pm 10\%$ recommandé.

Environnement de test : sec, sans milieu liquide.

7.3 Test de fonctionnement

Cette norme fournit cinq procédures d'essai (A, B, C, D, E), sélectionnées en fonction de la résistance à l'usure du matériau :

Procédure A : Test d'usure élevée, charge 130 N, vitesse de roue 200 tr/min, distance de glissement 4300 m, adapté aux matériaux résistants à l'usure moyenne à élevée.

Programme B : Variante courte durée, charge 130 N, vitesse de rotation de la roue 200 tr/min, distance de glissement 718 m, convient aux matériaux à faible et moyenne résistance à l'usure (à utiliser lorsque la perte de volume $> 100 \text{ mm}^3$).

Programme C : Variante courte durée, charge 130 N, vitesse de roue 200 tr/min, distance de glissement 71,8 m, convient aux revêtements minces.

Programme D : Variante légère, charge 45 N, vitesse de roue 200 tr/min, distance de glissement 4300 m, adaptée aux matériaux à faible résistance à l'usure.

Programme E : Variante courte durée, charge 45 N, vitesse de roue 200 tr/min, distance de glissement 718 m, convient aux matériaux à faible et moyenne résistance à l'usure.

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

L'échantillon est monté sur le testeur, en contact avec la roue en caoutchouc, et la charge est appliquée.

Démarrez le testeur et enregistrez la distance de glissement et l'usure de l'échantillon.

Chaque échantillon a été testé une fois et répété 3 à 5 fois pour garantir la stabilité des résultats.

7.4 Mesure des résultats

Après les tests, les échantillons ont été nettoyés, séchés et la masse finale a été mesurée (précision $\pm 0,1$ mg).

La profondeur d'usure a été mesurée à l'aide d'un profilomètre de surface (précision $\pm 0,001$ mm).

Calculer la perte de masse : $\Delta m = m_0 - m_1$ (m_0 est la masse initiale, m_1 est la masse finale).

7.5 Calcul de la perte de volume

Perte de volume :

$$V = \frac{\Delta m}{\rho}$$

dans:

V est la perte de volume en mm^3 ;

Δm est la perte de masse, en mg ;

ρ est la densité du matériau en g/cm^3 .

Taux d'usure :

$$W = \frac{V}{L}$$

dans:

W est le taux d'usure en mm^3/m ;

L est la distance de glissement en mètres.

8 Évaluation des résultats des tests

8.1 Plage de perte de volume

La plage de perte de volume dans les matériaux métalliques varie selon la procédure et le matériau :

Carbure cémenté (YG8, procédure A) : $10\text{-}20 \text{ mm}^3$.

Acier doux (AISI 1020, Procédure A) : $50\text{-}100 \text{ mm}^3$.

Matériaux hautement résistants à l'usure (Procédure B) : $5\text{-}15 \text{ mm}^3$.

8.2 Évaluation des écarts

de 3 à 5 échantillons est $\leq \pm 10\%$, sinon un nouveau test est nécessaire.

Si la perte de volume dépasse la plage attendue, la cause doit être analysée (comme une taille de particules abrasives inégale et des défauts de surface de l'échantillon).

8.3 Analyse des facteurs d'influence

Taille des particules abrasives : Les tailles de particules $> 300 \mu\text{m}$ augmenteront la perte de volume (écart $> 15\%$).

Charge : Des charges $> 130 \text{ N}$ peuvent provoquer une fissuration de l'échantillon et affecter les résultats.

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

Dureté de la roue en caoutchouc : Une dureté > Shore A 65 augmentera l'usure (écart > 10 %).
Microstructure : Une granulométrie inégale ($>\pm 0,2 \mu m$) ou une porosité élevée augmentera la perte de volume (écart > 10 %).

9 Rapport de test

Le rapport de test doit inclure les éléments suivants :

Informations sur l'échantillon : type de matériau, marque, numéro de lot, taille.

Conditions d'essai : Modèle d'équipement, type de procédure (A/B/C/D/E), charge (N), distance de glissement (m), type d'abrasif et taille des particules, température ambiante (10°C à 35°C), humidité (30%-80%).

Résultats des tests : masse initiale, masse finale, perte de masse, perte de volume (mm^3) , taux d'usure (mm^3/m), profondeur d'usure et valeur moyenne, écart.

Conclusion de l'évaluation : si elle correspond à la fourchette attendue.

Date du test et signature de l'opérateur.

Annexe A (Annexe informative) Valeurs de référence de la perte de volume des matériaux métalliques typiques

Type de matériau	Marque/catégorie	Procédure A Perte de volume (mm^3)	Procédure B Perte de volume (mm^3)	Applications typiques
carbure cimenté	YG8	10-20	5-10	Outils de coupe
Acier doux	AISI 1020	50-100	20-40	Pièces structurelles
Revêtement hautement résistant à l'usure	WC-10Co-4Cr	5-15	2-8	Équipement minier

Annexe B (Annexe informative) Exigences relatives à l'environnement de test

Température : 10°C à 35°C, 20±5°C recommandé.

Humidité : 30%-80%, 50±10% recommandé.

Aucune vibration, aucun environnement de gaz corrosif.

Planéité du banc d'essai : écart < 0,02 mm/m.

Annexe C (Annexe informative) Comparaison des procédures de test

programme	Charge (N)	Distance de glissement (m)	Champ d'application
UN	130	4300	Matériaux à résistance moyenne à élevée à l'usure
B	130	718	Matériaux à résistance à l'usure moyenne et faible
C	130	71,8	Revêtement mince

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

Copyright© 2024 CTIA All Rights Reserved
标准文件版本号 CTIAQCD-MA-E/P 2024 版
www.ctia.com.cn

电话/TEL: 0086 592 512 9696
CTIAQCD-MA-E/P 2018-2024V
sales@chinatungsten.com

D	45	4300	Matériau à faible résistance à l'usure
E	45	718	Matériaux à résistance à l'usure moyenne et faible

appendice:

EN ISO 6507-1:2018

Essai de dureté Vickers

Matériaux métalliques

— Essai de dureté Vickers — Partie 1 : Méthode d'essai

1 Portée

La présente norme spécifie la méthode de détermination de la dureté des matériaux métalliques par essai de dureté Vickers à température ambiante (10 °C à 35 °C). Elle comprend le principe de l'essai, les exigences relatives à l'équipement, la préparation des éprouvettes, les étapes de l'essai, le calcul et l'évaluation des résultats, le rapport d'essai, etc. Elle s'applique à l'essai de dureté Vickers de HV 1 à HV 3000, couvrant différentes charges (de 0,098 N à 2942 N). Elle ne s'applique pas à l'essai de dureté des éprouvettes de petite taille ou à parois minces (épaisseur < 0,1 mm) ni aux matériaux revêtus.

2 Références normatives

Les articles des documents suivants deviennent des articles de la présente norme par référence. Pour les documents référencés datés, seule la version référencée est applicable. Pour les documents référencés non datés, la dernière version (y compris tous les amendements) s'applique à la présente norme.

EN ISO 6507-2:2018 Matériaux métalliques — Essai de dureté Vickers Partie 2 : Vérification et étalonnage des duromètres

EN ISO 6507-3:2018 Matériaux métalliques — Essai de dureté Vickers Partie 3 : Étalons d'étalonnage

EN ISO 376:2011 Matériaux métalliques — Étalons de force d'étalonnage

EN ISO 18265:2013 Matériaux métalliques — Conversion entre dureté et résistance

3 Termes et définitions

Cette norme adopte la norme EN ISO 6507-1:2018 et les termes et définitions suivants :

Dureté Vickers (HV) : Capacité d'un matériau métallique à résister à la pénétration d'un pénétrateur Vickers, exprimée en valeur de dureté Vickers en N/mm² (ou MPa), calculée par la longueur diagonale de l'indentation.

Pénétrateur Vickers : Pénétrateur pyramidal en forme de diamant carré avec un angle au sommet de 136°.

Diagonale d'indentation : Longueur des deux diagonales de l'indentation carrée formée lorsque le pénétrateur Vickers est enfoncé dans la surface de l'échantillon, en mm.

Charge d'essai (F) : La force appliquée au pénétrateur Vickers en Newtons (N), allant de 0,098 N à 2942 N.

de maintien : Temps pendant lequel la charge est maintenue après que le pénétrateur a appliqué la charge, en secondes (s).

4 Principe du test

L'essai de dureté Vickers est réalisé en pressant un pénétrateur diamant Vickers standard (angle au

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

sommet de 136°) sur la surface d'un échantillon métallique avec une charge spécifiée, en le maintenant pendant un certain temps, puis en le relâchant. La longueur des deux diagonales de l'empreinte (d_1 , d_2) est mesurée, la longueur diagonale moyenne (d) est calculée, puis la dureté Vickers (HV) est calculée. La formule de calcul est la suivante :

$$HV = \frac{1.8544 \times F}{d^2}$$

dans:

F est la charge d'essai, en N ;

d 为压痕两条对角线的平均长度, 单位为 mm, $d = \frac{d_1 + d_2}{2}$;

L'unité de dureté est N/mm² (1 kgf / mm² $\approx$ 9,807 N/mm²) .

5 Équipements de test

5.1 Testeur de dureté Vickers

Conforme aux exigences de vérification et d'étalonnage de la norme EN ISO 6507-2:2018.

Plage de charge : 0,098 N à 2942 N (HV 0,01 à HV 30), précision $\pm 0,5\%$.

Contrôle du temps de maintien : 5 s à 60 s, écart $< \pm 0,5$ s.

5.2 Hauteur de pression

Pénétrateur diamant Vickers standard, angle au sommet 136° ($\pm 0,5^\circ$).

La surface de l'indenteur est exempte de défauts et présente des bords nets (inspection au microscope, résolution $< 0,5 \mu\text{m}$) .

5.3 Appareil de mesure

Microscope optique : grossissement 50×-1000×, 400× recommandé, résolution $< 0,5 \mu\text{m}$.

Equippé d'un système de lecture numérique avec une précision de mesure de $\pm 0,001$ mm.

5.4 Bloc d'étalonnage

Blocs d'étalonnage standard conformes à la norme EN ISO 6507-3:2018, plage de dureté HV 100-3000, écart $< \pm 2\%$.

La rugosité de surface du bloc d'étalonnage est $R_a < 0,05 \mu\text{m}$.

5.5 Contrôle environnemental

Température : 10°C à 35°C, 20 $\pm$ 5°C recommandé.

Humidité : 30%-80%, 50 $\pm$ 10% recommandé.

Aucune vibration, aucun environnement de gaz corrosif.

6. Préparation des échantillons

6.1 Exigences relatives à l'échantillon

Forme de l'échantillon : cuboïde, cylindre ou autre forme géométrique régulière, surface d'essai $> 5 \times 5$ mm, épaisseur $> 0,5$ mm (en fonction de la charge).

La surface d'essai doit être plane et exempte de fissures, de couches d'oxyde ou de défauts d'usinage.

Rugosité de surface $R_a < 0,1 \mu\text{m}$ (polie), pour les essais à faible charge ($< 9,807$ N), $R_a < 0,05 \mu\text{m}$.

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

L'épaisseur de l'échantillon doit répondre aux exigences suivantes : épaisseur $\geq 1,5 \times$ longueur diagonale de l'empreinte.

6.2 Nombre d'échantillons

Le nombre d'échantillons dans chaque lot ne doit pas être inférieur à 3 pour garantir la représentativité statistique.

Si l'écart de résultat est important ($> 3\%$), le nombre d'échantillons doit être augmenté à 5.

6.3 Exemple de marquage

Les échantillons doivent être marqués avec le numéro de lot, la nuance (comme l'acier YG8, S235JR) et l'élément d'essai, et le marquage ne doit pas affecter la zone d'essai.

6.4 Nettoyage des échantillons

Avant le test, nettoyez la surface de l'échantillon avec de l'éthanol anhydre ou de l'acétone pour éliminer l'huile, la poussière et utilisez-le après séchage.

7 étapes de test

7.1 Étalonnage de l'équipement

Utilisez le bloc d'étalonnage standard pour étalonner le duromètre. Sélectionnez le bloc d'étalonnage correspondant à la charge d'essai. Mesurez 3 fois. L'écart de dureté est $\leq \pm 1\%$.

Vérifiez l'état du pénétrateur pour vous assurer qu'il n'y a pas d'usure ou de défaut.

7.2 Conditions d'essai

Température ambiante : 10°C à 35°C , $20 \pm 5^{\circ}\text{C}$ recommandé.

Humidité relative : 30% - 80% , $50 \pm 10\%$ recommandé.

Aucune vibration, aucun environnement de gaz corrosif.

7.3 Sélection de la charge

Sélectionnez la charge en fonction de la dureté du matériau et de l'épaisseur de l'échantillon :

Carbure : 294,2 N (30 kgf, HV 30) est recommandé.

Acier : 50 N à 294,2 N (HV 5 à HV 30).

Échantillons à parois minces : 0,098 N à 9,807 N (HV 0,01 à HV 1).

La charge doit garantir que la longueur diagonale d de l'empreinte est comprise entre 0,020 mm et 1,400 mm.

7.4 Test de fonctionnement

Placez l'échantillon sur l'établi du testeur de dureté, en vous assurant que la surface d'essai est de niveau.

Sélectionnez une charge appropriée (par exemple 294,2 N) et maintenez la charge pendant 10 à 15 s (ou ajustez-la en fonction des exigences du matériau).

L'indenteur est lentement enfoncé dans la surface de l'échantillon et déchargé automatiquement

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

après avoir maintenu la charge.

5 points d'indentation doivent être mesurés pour chaque échantillon, avec un espacement d'indentation > 3 fois la longueur diagonale (> 0,3 mm) et une distance du bord de l'échantillon > 0,5 mm.

7.5 Mesure et calcul

Les longueurs des deux lignes diagonales de l'indentation (d1, d2) ont été mesurées à l'aide d'un microscope optique avec une précision de $\pm 0,001$ mm.

Calculer la longueur diagonale moyenne :

$$d = \frac{d_1 + d_2}{2}$$

Calculer la dureté Vickers :

$$HV = \frac{1.8544 \times F}{d^2}$$

cinq points d'indentation sont considérés comme la valeur de dureté de l'échantillon, avec un écart de $\leq \pm 3\%$.

8 Évaluation des résultats des tests

8.1 Plage de valeurs de dureté

Plage de dureté Vickers des matériaux métalliques : HV 100-3000, la valeur spécifique dépend du matériau :

Carbure cémenté (YG8) : HV 1450-1550.

Acier trempé (42CrMo4) : HV 500-700.

Alliage d'aluminium (6082-T6) : HV 50-150.

8.2 Évaluation des écarts

les 5 points d'indentation sont $\leq \pm 3\%$, sinon un nouveau test est nécessaire.

Si la valeur de dureté dépasse les exigences techniques du matériau, la cause doit être analysée (comme des défauts de surface, une inadéquation de charge).

8.3 Analyse des facteurs d'influence

Sélection de la charge : Si la charge est trop faible ($< 0,098$ N), une indentation nette peut ne pas se former ; si la charge est trop élevée (> 2942 N), l'échantillon peut être déformé.

Qualité de surface : Une rugosité de surface $R_a > 0,1 \mu\text{m}$ entraînera des valeurs de dureté inférieures (écart $> 5\%$).

Temps de maintien : Un temps < 5 s ou > 60 s affectera la taille de l'indentation (écart $\pm 2\%$).

Épaisseur de l'échantillon : une épaisseur $< 1,5 \times$ la longueur diagonale de l'indentation entraînera un effet de support et une valeur de dureté élevée (écart $> 10\%$).

9 Rapport de test

Le rapport de test doit inclure les éléments suivants :

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

Informations sur l'échantillon : type de matériau, marque, numéro de lot, taille.
Conditions d'essai : modèle d'équipement, charge (N), temps de maintien (s), température ambiante (10°C à 35°C), humidité (30%-80%).
Résultats des tests : longueur diagonale moyenne de chaque indentation (d), valeur de dureté (HV), valeur de dureté moyenne et écart.
Conclusion de l'évaluation : si le matériel répond aux exigences techniques.
Date du test et signature de l'opérateur.

Annexe A (Annexe informative) Valeurs de référence de dureté Vickers pour les matériaux métalliques typiques

Type de matériau	Marque/catégorie	Dureté Vickers (HV)	Charge typique (N)	Applications typiques
carbure cémenté	YG8	1450-1550	294,2	Outils de coupe
Acier trempé	42CrMo4	500-700	294,2	Pièces mécaniques
alliage d'aluminium	6082-T6	50-150	9.807	Structures aérospatiales
fonte	EN-GJL-250	200-300	98.07	Bloc moteur

Annexe B (Annexe informative) Tableau de la relation entre la dureté Vickers et la charge

Charge (N)	Symbole de dureté	Plage de longueur diagonale de l'indentation (mm)	Matériaux applicables
0,098	HV 0,01	0,020-0,050	Parois minces ou petits spécimens
9.807	HV 1	0,050-0,150	Métaux mous (comme l'aluminium)
98.07	HV 10	0,150-0,400	Matériaux moyennement durs (comme la fonte)
294,2	HV 30	0,400-1,000	Alliage dur, acier
2942	HV 300	1.000-1.400	Matériaux extra-durs

Annexe C (Annexe informative) Exigences relatives à l'environnement de test

Température : 10°C à 35°C, 20±5°C recommandé.
Humidité : 30%-80%, 50±10% recommandé.
Aucune vibration, aucun environnement de gaz corrosif.
Planéité du banc d'essai : écart < 0,02 mm/m.

La norme EN ISO 6507-1:2018 « Matériaux métalliques – Essai de dureté Vickers » fournit une procédure normalisée pour l'essai de dureté Vickers des matériaux métalliques. Elle garantit l'exactitude et la répétabilité des résultats grâce à une préparation d'éprouvettes, des étapes d'essai et une évaluation normalisées. La mise en œuvre de cette norme s'applique au contrôle qualité et à

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

l'évaluation des performances de matériaux tels que le carbure cimenté, l'acier et les alliages d'aluminium, offrant ainsi un support technique fiable pour des domaines d'application tels que la fabrication de machines, l'aéronautique et la fabrication de moules.

appendice:

EN ISO 18265:2013

Matériaux métalliques - Conversion entre dureté et résistance

Matériaux métalliques — Conversion des valeurs de dureté

1 Portée

Cette norme spécifie la méthode de conversion entre différentes méthodes d'essai de dureté, ainsi qu'entre les valeurs de dureté et la résistance à la traction des matériaux métalliques. Elle s'applique aux métaux ferreux (tels que l'acier au carbone, l'acier allié et l'acier inoxydable) et aux métaux non ferreux (tels que l'aluminium, le cuivre et leurs alliages). La méthode de conversion est basée sur des données empiriques et s'applique aux valeurs de dureté mesurées à température ambiante (10 °C à 35 °C). Elle ne s'applique pas à la conversion de dureté des carbures cémentés (tels que le WC-Co), des matériaux extra-durs (tels que le diamant) ni des matériaux à durcissement superficiel (tels que l'acier cémenté).

2 Références normatives

Les articles des documents suivants deviennent des articles de la présente norme par référence. Pour les documents référencés datés, seule la version référencée est applicable. Pour les documents référencés non datés, la dernière version (y compris tous les amendements) s'applique à la présente norme.

EN ISO 6506-1:2014 Matériaux métalliques — Essai de dureté Brinell Partie 1 : Méthode d'essai
EN ISO 6507-1:2018 Matériaux métalliques — Essai de dureté Vickers Partie 1 : Méthode d'essai
EN ISO 6508-1:2016 Matériaux métalliques — Essai de dureté Rockwell Partie 1 : Méthode d'essai
EN ISO 4545-1:2017 Matériaux métalliques — Essai de dureté Knoop Partie 1 : Méthode d'essai
EN ISO 6892-1:2019 Matériaux métalliques — Essai de traction Partie 1 : Méthode d'essai à température ambiante

3 Termes et définitions

Cette norme adopte la norme EN ISO 18265:2013 et les termes et définitions suivants :

Dureté : Capacité d'un matériau métallique à résister à la pénétration d'un pénétrateur, mesurée à l'aide de différentes méthodes (telles que Vickers, Brinell, Rockwell et Knoop).

Résistance à la traction (Rm) : contrainte maximale qu'un matériau métallique peut supporter lors d'un essai de traction, mesurée en MPa.

Conversion : Processus de conversion d'une valeur de dureté en une autre valeur de dureté ou de résistance à la traction en fonction de relations empiriques.

Dureté Vickers (HV) : Valeur de dureté mesurée par le test de dureté Vickers, l'unité est N/mm².

Dureté Brinell (HBW) : Valeur de dureté mesurée par le test de dureté Brinell, l'unité est HBW (pénétrateur à bille en carbure).

Dureté Rockwell (HR) : Valeur de dureté mesurée par le test de dureté Rockwell. Les échelles courantes sont HRC, HRB et HRA.

4 Principe de conversion

La conversion entre dureté et dureté, ou entre dureté et résistance à la traction, repose sur des

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

données empiriques et une analyse de régression. La relation de conversion varie selon le type de matériau, l'état de traitement thermique et la microstructure (granulométrie, distribution des phases, etc.). Cette norme fournit des tables et des formules de conversion, mais les résultats de conversion ne sont que des valeurs approximatives et l'écart peut atteindre $\pm 10\%$. Les facteurs suivants doivent être pris en compte lors de la conversion :

Catégorie de matériaux : métaux à base de fer (tels que l'acier au carbone, l'acier allié) ou métaux non ferreux (tels que l'aluminium, le cuivre).

Plage de dureté : Différentes méthodes de test de dureté ont des plages applicables (telles que HRC 20-70).

Conditions d'essai : charge d'essai de dureté, temps de maintien et qualité de surface de l'échantillon.

5 Conditions de conversion

5.1 Champ d'application

Métaux à base de fer : acier au carbone, acier allié, acier inoxydable.

Métaux non ferreux : aluminium et alliages d'aluminium, cuivre et alliages de cuivre.

Plage de dureté :

Dureté Vickers (HV) : 100-1000.

Dureté Brinell (HBW) : 100-700.

Dureté Rockwell (HRC) : 20-70.

Résistance à la traction (Rm) : 300-2000 MPa.

5.2 Restrictions

Ne convient pas au carbure cémenté (tel que WC-Co) et aux matériaux ultra-durs (tels que le diamant).

Ne convient pas aux matériaux durcissant en surface (tels que les couches de cémentation et de nitruration).

Il ne convient pas aux matériaux présentant une microstructure anormale (comme une ségrégation sévère et une porosité élevée).

L'écart de conversion peut atteindre $\pm 10\%$ et est donné à titre indicatif uniquement.

5.3 Exigences de test

Le test de dureté doit être conforme aux normes pertinentes (telles que EN ISO 6507-1:2018).

La rugosité de surface de l'échantillon est $Ra < 0,1 \mu m$ et l'épaisseur est $\geq 1,5 \times$ la longueur diagonale de l'indentation.

Température ambiante : $10^{\circ}C$ à $35^{\circ}C$, $20 \pm 5^{\circ}C$ recommandé.

6 Méthode de conversion

6.1 La conversion entre les duretés

s'effectue à l'aide des tableaux fournis dans la norme. Voici quelques exemples :

HRC vers HV :

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

HRC 30 $\approx$ HV 320

HRC 50 $\approx$ HV 550

HRC 30 $\approx$ HV 320
HRC 50 $\approx$ HV 550

HV à HBW (acier au carbone) :

HV 200 $\approx$ HBW 190

HV 500 $\approx$ HBW 475

HV 200 $\approx$ HBW 190
HV 500 $\approx$ HBW 475

6.2 Conversion entre dureté et résistance à la traction.

La conversion s'effectue à l'aide des tableaux ou formules fournis par la norme. Voici quelques exemples :

HRC à R_m (acier trempé) :

HRC 30 $\approx$ R_m 900

MPa HRC 50 $\approx$ R_m 1500

HRC 30 $\approx$ R _m 900 MPa
HRC 50 $\approx$ R _m 1500 MPa

HBW à R_m (acier au carbone, non traité thermiquement) :

R_m $\approx$ 3,3 $\times$ HBW (HBW 100-400)

HBW 200 $\approx$ R_m 660 MPa

R _m $\approx$ 3.3 $\times$ HBW (HBW 100-400)
HBW 200 $\approx$ R _m 660 MPa

6.3 Structure du tableau de conversion

Tableau A : Conversion de la dureté des métaux à base de fer (acier au carbone, acier allié).

Tableau B : Conversion de la dureté de l'acier inoxydable.

Tableau C : Conversion de dureté des métaux non ferreux (aluminium, cuivre).

Tableau D : Conversion entre la dureté et la résistance à la traction.

7 Évaluation des résultats de conversion

7.1 Analyse des écarts

Écart de conversion de dureté : $\pm 5\%$ à 10% , selon le matériau et la plage de dureté.

Écart de conversion entre la dureté et la résistance à la traction : $\pm 10\%$ - 15% , selon l'état du traitement thermique.

7.2 Facteurs d'influence

Microstructure : Une granulométrie inégale ($> \pm 0,2 \mu m$) ou une distribution de phase inégale peut entraîner de grands écarts ($> 10\%$).

État du traitement thermique : L'écart de conversion de l'acier trempé et revenu et de l'acier recuit est différent ($\pm 5\%$ à 15%).

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

Conditions de test : La charge, le temps de maintien et la qualité de la surface de l'échantillon du test de dureté affecteront la précision de la conversion.

7.3 Recommandations

Les tests directs (tels que les tests de traction) pour obtenir la résistance à la traction sont préférés à la conversion.

Le résultat de la conversion est fourni à titre indicatif uniquement et doit être vérifié si nécessaire (lorsque l'écart est > 10 %).

8 Rapport de conversion

Le rapport de conversion doit inclure les éléments suivants :

Informations sur le matériau : type de matériau, qualité, état du traitement thermique.

Informations sur le test de dureté : méthode d'essai (telle que Vickers), charge (N), valeur de dureté et écart.

Résultats de conversion : valeur de dureté cible ou valeur de résistance à la traction, base de conversion (numéro de tableau).

Évaluation des écarts : plage d'écart de conversion et analyse des facteurs d'influence.

Date du rapport et signature de l'opérateur.

Annexe A (Annexe normative) Tableau de conversion de la dureté des métaux à base de fer (exemples partiels)

HRC	HT	HBW	HRA	Matériaux applicables
20	240	228	60	Acier doux
30	320	304	67	Acier à teneur moyenne en carbone
40	420	400	73	Acier trempé
50	550	525	78	Acier à haute résistance

Annexe B (Annexe normative) Tableau de conversion de la dureté de l'acier inoxydable (exemples partiels)

HRC	HT	HBW	Matériaux applicables
20	250	238	Acier inoxydable austénitique
30	330	315	Acier inoxydable martensitique
40	430	410	Acier inoxydable à durcissement par précipitation

Annexe C (Annexe normative) Tableau de conversion de la dureté des métaux non ferreux (exemples partiels)

HBW	HT	Matériaux applicables
50	55	Aluminium pur
100	110	Alliage d'aluminium (tel que 6061)

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

Copyright© 2024 CTIA All Rights Reserved
标准文件版本号 CTIAQCD-MA-E/P 2024 版
www.ctia.com.cn

电话/TEL: 0086 592 512 9696
CTIAQCD-MA-E/P 2018-2024V
sales@chinatungsten.com

HBW	HT	Matériaux applicables
150	165	laiton

Annexe D (Annexe normative) Tableau de conversion de la dureté et de la résistance à la traction (quelques exemples)

HBW	R _m R _m (MPa)	Matériaux applicables
150	495	Acier au carbone non traité thermiquement
200	660	Acier au carbone non traité thermiquement
300	1000	Acier trempé et revenu

Annexe E (Annexe informative) Exigences relatives à l'environnement de test

Température : 10°C à 35°C, 20±5°C recommandé.

Humidité : 30%-80%, 50±10% recommandé.

Aucune vibration, aucun environnement de gaz corrosif.

Résumer

La norme EN ISO 18265:2013 « Matériaux métalliques – Conversion entre dureté et résistance » fournit une procédure normalisée pour la conversion des valeurs de dureté des matériaux métalliques et garantit la fiabilité et la cohérence des résultats de conversion grâce à des tables et conditions de conversion détaillées. La mise en œuvre de cette norme aide les ingénieurs en matériaux à évaluer approximativement la dureté et la résistance en l'absence de conditions d'essai directes, et convient à l'analyse des performances des matériaux dans les secteurs de la fabrication de machines, de la construction, de l'énergie, etc.

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

Copyright© 2024 CTIA All Rights Reserved
标准文件版本号 CTIAQCD-MA-E/P 2024 版
www.ctia.com.cn

电话/TEL: 0086 592 512 9696
CTIAQCD-MA-E/P 2018-2024V
sales@chinatungsten.com

appendice:

EN ISO 6892-1:2019

Essais de traction des matériaux métalliques

Matériaux métalliques — Essais de traction

— Partie 1 : Méthode d'essai à température ambiante

1 Portée

La présente norme spécifie la méthode d'essai de traction des matériaux métalliques à température ambiante (10 °C à 35 °C) afin de déterminer leurs propriétés mécaniques, notamment la limite d'élasticité, la résistance à la traction, l'allongement après rupture, le retrait transversal, etc. Elle s'applique aux barres, plaques, tubes, fils et pièces usinées en divers matériaux métalliques (acier, alliages d'aluminium, alliages de cuivre, etc.). Elle ne s'applique pas aux essais effectués à des températures supérieures à 10 °C et 35 °C, ni aux essais d'éprouvettes de petite taille (épaisseur < 0,1 mm, par exemple).

2 Références normatives

Les articles des documents suivants deviennent des articles de la présente norme par référence. Pour les documents référencés datés, seule la version référencée est applicable. Pour les documents référencés non datés, la dernière version (y compris tous les amendements) s'applique à la présente norme.

EN ISO 7500-1:2018 Matériaux métalliques — Machines d'essai de traction et de compression
Partie 1 : Dispositifs étalons de force d'étalonnage

EN ISO 9513:2012 Matériaux métalliques — Étalonnage des systèmes extensométriques

EN ISO 377:2017 Acier et produits en acier — Échantillonnage et préparation des éprouvettes pour les essais de traction

EN ISO 148-1:2016 Matériaux métalliques — Essai de choc Charpy au pendule Partie 1 : Méthode d'essai

EN ISO 18265:2013 Matériaux métalliques — Conversion entre dureté et résistance

3 Termes et définitions

Cette norme adopte la norme EN ISO 6892-1:2019 et les termes et définitions suivants :

Limite d'élasticité (R_p) ou résistance à l'extension plastique spécifiée ($R_{p0,2}$) : Contrainte à laquelle l'échantillon subit une déformation plastique spécifiée pendant la traction, exprimée en MPa.

Résistance à la traction (R_m) : Contrainte maximale qu'un échantillon supporte pendant la traction, exprimée en MPa.

Allongement après rupture (A) : Pourcentage d'allongement plastique de la section de longueur de jauge après que l'échantillon se soit rompu à la longueur de jauge d'origine, exprimé en %.

Retrait sectionnel (Z) : Pourcentage de réduction de la section transversale après la rupture de l'échantillon jusqu'à la section transversale d'origine, exprimé en %.

Longueur de jauge (L_0) : Longueur initiale de l'échantillon utilisée pour mesurer l'allongement, en mm.

4 Principe du test

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

L'essai de traction consiste à appliquer une charge de traction uniaxiale à l'échantillon métallique sur une machine d'essai universelle jusqu'à la rupture de l'échantillon. La courbe charge-déplacement est enregistrée et les paramètres des propriétés mécaniques (tels que la limite d'élasticité, la résistance à la traction, l'allongement, etc.) sont calculés. Le processus d'essai comprend les phases d'élasticité, d'élasticité, de déformation plastique uniforme et de rupture par striction. La formule de calcul des propriétés mécaniques est la suivante :

屈服强度或规定塑性延伸强度:

$$R_p = \frac{F_p}{A_0}$$

抗拉强度:

$$R_m = \frac{F_m}{A_0}$$

断后延伸率:

$$A = \frac{L_u - L_0}{L_0} \times 100$$

断面收缩率:

$$Z = \frac{A_0 - A_u}{A_0} \times 100$$

dans:

F_p est la charge d'élasticité, en N ;

F_m est la charge maximale, en N ;

A_0 est la section transversale d'origine en mm^2 ;

L_0 est la longueur de jauge d'origine, en mm;

L_u est la longueur entre repères après fracture, en mm;

A_u est la section transversale minimale après rupture, en mm^2 .

5 Équipements de test

5.1 Machine d'essai universelle

Plage de charge : 0-1000 kN , précision $\pm 0,5$ %, conforme aux exigences d'étalonnage de la norme EN ISO 7500-1:2018.

Contrôle de la vitesse de chargement : taux de contrainte de 0,00025/s à 0,0025/s, ou taux de déformation de 0,0001/s à 0,001/s.

5.2 Extensomètre

Conforme aux exigences d'étalonnage de la norme EN ISO 9513:2012 avec une précision de $\pm 0,5$ %.

Plage de mesure : couvre les étapes de déformation élastique et plastique de l'échantillon.

5.3 Outils de mesure

Pied à coulisse : précision $\pm 0,02$ mm, utilisé pour mesurer la taille de l'échantillon.

Micromètre : précision $\pm 0,001$ mm, utilisé pour mesurer la section transversale.

5.4 Contrôle environnemental

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

Température : 10°C à 35°C, 20±5°C recommandé.

Humidité : 30%-80%, 50±10% recommandé.

Aucune vibration, aucun environnement de gaz corrosif.

6. Préparation des échantillons

6.1 Type d'échantillon

比例试样: 标距长度 L_0 与横截面积 A_0 的平方根成比例, 常用 $L_0 = 5.65\sqrt{A_0}$.

Échantillon non proportionnel : La longueur de jauge L_0 est fixe, par exemple 50 mm ou 80 mm.

Forme de l'éprouvette : ronde, rectangulaire, tubulaire ou métallique. Les dimensions spécifiques sont conformes à la norme EN ISO 377:2017.

6.2 Exigences relatives à l'échantillon

La surface de l'échantillon est lisse, sans fissures, couche d'oxyde ou défauts de traitement.

Rugosité de surface $R_a < 0,2 \mu\text{m}$ (polie).

Les échantillons doivent être prélevés dans le sens de laminage du matériau, sauf accord contraire.

6.3 Nombre d'échantillons

Le nombre d'échantillons dans chaque lot ne doit pas être inférieur à 3 pour garantir la représentativité statistique.

Si l'écart de résultat est important ($> 10\%$), le nombre d'échantillons doit être augmenté à 5.

6.4 Exemple de marquage

Les échantillons d'essai doivent être marqués avec le numéro de lot, la marque (comme S355JR, 6061-T6) et les éléments d'essai, et le marquage ne doit pas affecter la zone d'essai.

6.5 Mesure de l'échantillon

Mesurer la section transversale d'origine de l'échantillon A_0 et la longueur de jauge L_0 , précision $\pm 0,02 \text{ mm}$.

7 étapes de test

7.1 Étalonnage de l'équipement

La machine d'essai a été calibrée à l'aide d'un capteur de force standard avec un écart de charge de $< \pm 0,5\%$.

La mesure de la déformation a été calibrée à l'aide d'un extensomètre standard avec un écart de $< \pm 0,5\%$.

7.2 Conditions d'essai

Température ambiante : 10°C à 35°C, 20±5°C recommandé.

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

Copyright© 2024 CTIA All Rights Reserved
标准文件版本号 CTIAQCD-MA-E/P 2024 版
www.ctia.com.cn

电话/TEL: 0086 592 512 9696
CTIAQCD-MA-E/P 2018-2024V
sales@chinatungsten.com

Humidité relative : 30%-80%, 50±10% recommandé.

Aucune vibration, aucun environnement de gaz corrosif.

7.3 Test de fonctionnement

Installez l'échantillon dans le dispositif de la machine d'essai, en vous assurant que l'axe de l'échantillon est aligné avec l'axe central du dispositif.

Appliquer une charge initiale (ne dépassant pas 10 % de la charge d'élasticité) et éliminer les espaces d'installation.

Sélectionnez une vitesse de chargement :

Stade élastique : taux de contrainte 0,00025/s à 0,0025/s.

Etage plastique : vitesse de déformation de 0,0001/s à 0,001/s.

La courbe charge-déplacement a été enregistrée jusqu'à la rupture de l'échantillon.

Chaque échantillon a été testé une fois et répété 3 à 5 fois pour garantir la stabilité des résultats.

7.4 Mesure des résultats

Enregistrez la charge d'élasticité F_p et la charge maximale F_m .

Utiliser un extensomètre pour mesurer la déformation au stade de la limite d'élasticité (par exemple $R_p 0,2$).

Après la rupture de l'échantillon, mesurez la longueur de jauge après rupture L_u et la section transversale A_u .

7.5 Calcul du résultat

屈服强度或 $R_p 0.2$:

$$R_p = \frac{F_p}{A_0}$$

抗拉强度:

$$R_m = \frac{F_m}{A_0}$$

断后延伸率:

$$A = \frac{L_u - L_0}{L_0} \times 100$$

断面收缩率:

$$Z = \frac{A_0 - A_u}{A_0} \times 100$$

8 Évaluation des résultats des tests

8.1 Plage de propriétés mécaniques

La gamme des propriétés mécaniques des matériaux métalliques dépend du matériau :

低碳钢 (S355JR) : $R_p 0.2$ 355 MPa, R_m 470-630 MPa, A 20%-25%.

铝合金 (6061-T6) : $R_p 0.2$ 240 MPa, R_m 310 MPa, A 8%-12%.

不锈钢 (304) : $R_p 0.2$ 205 MPa, R_m 520 MPa, A 40%-50%.

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

8.2 Évaluation des écarts

de 3 à 5 échantillons est $\leq \pm 10\%$, sinon un nouveau test est nécessaire.
Si la valeur de performance dépasse les exigences techniques du matériau, les raisons doivent être analysées (telles que les défauts de l'échantillon, la vitesse de chargement inappropriée).

8.3 Analyse des facteurs d'influence

Vitesse de chargement : Une vitesse trop rapide ($> 0,0025/s$) entraînera une limite d'élasticité plus élevée (écart $> 5\%$).
Qualité de l'échantillon : Rugosité de surface $R_a > 0,2\ \mu m$ ou défauts pouvant entraîner une fracture prématurée (écart $> 10\%$).
Alignement des fixations : des fixations mal alignées peuvent provoquer une concentration de contraintes et réduire l'allongement (écart $> 15\%$).
Microstructure : Une granulométrie inégale ($> \pm 0,2\ \mu m$) ou des inclusions excessives réduiront les performances (écart $> 10\%$).

9 Rapport de test

Le rapport de test doit inclure les éléments suivants :
Informations sur l'échantillon : type de matériau, marque, numéro de lot, taille, direction d'échantillonnage.
Conditions de test : modèle d'appareil, vitesse de chargement, température ambiante ($10^{\circ}C$ à $35^{\circ}C$), humidité (30%-80%).
Résultats des essais : limite d'élasticité ($R_p 0,2$), résistance à la traction (R_m), allongement après rupture (A), réduction de surface (Z), valeur moyenne et écart.
Conclusion de l'évaluation : si le matériel répond aux exigences techniques.
Date du test et signature de l'opérateur.

Annexe A (Annexe informative) Valeurs de référence des propriétés mécaniques des matériaux métalliques typiques

Type de matériau	Marque/catégorie	$R_p 0,2$ (MPa)	R_m (MPa)	UN(%)	Z(%)	Applications typiques
Acier doux	S355JR	355	470-630	20-25	50-60	Structure du bâtiment
alliage d'aluminium	6061-T6	240	310	8-12	20-30	Structures aérospatiales
Acier inoxydable	304	205	520	40-50	60-70	Équipement alimentaire

Annexe B (Annexe informative) Tableau recommandé des dimensions des échantillons

Type de spécimen	Longueur de jauge L_0 (mm)	Section transversale A_0 (mm ²)	Matériaux applicables
Éprouvette d'essai	$5,65\sqrt{A_0}$	50-200	Acier, alliage

Type de spécimen	Longueur de jauge L_0 (mm)	Section transversale A_0 (mm ²)	Matériaux applicables
proportionnelle			d'aluminium
Spécimens proportionnels	non 50	20-100	Plaques minces, fils

Annexe C (Annexe informative) Exigences relatives à l'environnement de test

Température : 10°C à 35°C, 20±5°C recommandé.

Humidité : 30%-80%, 50±10% recommandé.

Aucune vibration, aucun environnement de gaz corrosif.

Planéité du banc d'essai : écart < 0,02 mm/m.

Partie 3 : Optimisation des performances du carbure cimenté

Chapitre 7 : Contrôle des propriétés mécaniques du carbure cimenté

7.0 Propriétés mécaniques du carbure cimenté

7.0. 1. Dureté élevée du carbure cimenté

7.0. 1. 0 Quelle est la dureté du carbure cimenté ?

7.0.1.1 Méthode de mesure de la dureté du carbure cimenté

7.0.1.2 Facteurs affectant la dureté

Mécanisme microscopique de la dureté

7.0.1.4 Importance de la dureté dans l'application

7.0.1.5 Compromis entre dureté et ténacité

7.0.1.6 Résumé

7.0. 2. Ténacité à la rupture du carbure cimenté

7.0.2.1. Définition de la ténacité à la rupture du carbure cimenté

7.0.2.2. Méthode de mesure de la ténacité à la rupture du carbure cimenté

7.0.2.3. Facteurs affectant la ténacité à la rupture du carbure cimenté

7.0.2.4. Mécanisme microscopique de la ténacité à la rupture du carbure cimenté

7.0.2.5. Importance de la ténacité à la rupture du carbure cimenté pour l'application

7.0.2.6. Optimisation et développement futur de la ténacité à la rupture du carbure cimenté

7.0. 3. Résistance à la compression du carbure cimenté

7.0.3.1. Définition de la résistance à la compression du carbure cimenté

7.0.3. 2. Méthode de mesure de la résistance à la compression du carbure cimenté

7.0.3.3. Facteurs affectant la résistance à la compression du carbure cimenté

7.0.3.4. Micromécanisme de la résistance à la compression du carbure cimenté

7.0.3.5. Importance de la résistance à la compression du carbure cimenté pour l'application

7.0.3.6. Optimisation et développement futur de la résistance à la compression du carbure cimenté

7.0.4. Résistance à l'usure du carbure cimenté

7.0.4.1. Définition de la résistance à l'usure du carbure cimenté

7.0.4.2. Méthode de mesure de la résistance à l'usure du carbure cimenté

7.0.4.3. Facteurs affectant la résistance à l'usure du carbure cimenté

7.0.4.4. Micromécanisme de résistance à l'usure du carbure cimenté

7.0.4.5. Importance de la résistance à l'usure du carbure cimenté pour l'application

7.0.4.6. Optimisation et développement futur de la résistance à l'usure du carbure cimenté

7.0.5. Résistance à la fatigue du carbure cimenté

7.0.5.1. Définition de la résistance à la fatigue du carbure cimenté

7.0.5.2. Méthode de mesure de la résistance à la fatigue du carbure cimenté

7.0.5.3. Facteurs affectant la résistance à la fatigue du carbure cimenté

7.0.5.4. Mécanisme microscopique de résistance à la fatigue du carbure cimenté

7.0.5.5. Importance de la résistance à la fatigue du carbure cimenté pour l'application

7.0.5.6. Optimisation et développement futur de la résistance à la fatigue du carbure cimenté

7.0.6. Résistance aux chocs du carbure cimenté

7.0.6.1. Définition de la résistance aux chocs du carbure cimenté

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

- 7.0.6.2. Méthode de mesure de la résistance aux chocs du carbure cimenté
- 7.0.6.4. Mécanisme microscopique de résistance aux chocs du carbure cimenté
- 7.0.6.5. Importance de la résistance aux chocs du carbure cimenté pour l'application
- 7.0.6.6. Optimisation et développement futur de la résistance aux chocs des carbures cimentés
- 7.0.7. Analyse complète et application des propriétés mécaniques du carbure cimenté
 - 7.0.7.1. Compromis entre les propriétés mécaniques du carbure cimenté
 - 7.0.7.2. Stratégies d'optimisation des propriétés mécaniques du carbure cimenté
 - 7.0.7.3. Scénarios d'application des propriétés mécaniques du carbure cimenté
 - 7.0.7.4. Évolution future des propriétés mécaniques du carbure cimenté
- 7.1 Équilibre entre dureté et ténacité du carbure cimenté
 - 7.1.1 Effet de la taille des grains (relation Hall-Petch)
 - 7.1.1.1 Effet de la taille des grains 7.1.1.2
 - Mécanisme de Hall-Petch et analyse mécanique
 - 7.1.2.2 Effet quantitatif de la teneur en liant sur la ténacité
 - 7.1.2.3 Relation hiérarchique entre le type de phase de liaison et la ténacité
 - 7.1.2.4 Stratégie de compromis solide et d'optimisation collaborative
 - 7.1.2.5 Vérification des pratiques d'ingénierie
 - 7.1.2.6 Reconnaissance finale
- 7.2 Résistance à la fatigue et aux chocs du carbure cimenté
 - 7.2.1 Croissance des fissures du carbure cimenté sous chargement cyclique (loi de Paris)
- 7.3 Analyse du mécanisme de rupture du carbure cimenté
 - 7.3.2 Fracture et écaillage du carbure cimenté (concentration de contrainte et microfissures)
- 7.4. Stratégies d'amélioration des performances du carbure cimenté
 - 7.4.1 Stratégie d'amélioration des performances du carbure cimenté - Affinage du grain du carbure cimenté
 - 7.4.2 Stratégies d'amélioration des performances du carbure cimenté, additifs pour carbure cimenté (VC, TaC)
 - 7.4.3 Stratégies pour améliorer les performances du carbure cimenté et renforcer la surface du carbure cimenté
 - 7.4.4 Stratégie d'amélioration des performances du carbure cimenté - Technologie de fabrication avancée du carbure cimenté (impression 3D)
- 7.5 Tendances de développement futures : application de l'IA et de l'IIoT à l'optimisation des performances du carbure cimenté
 - 7.5.1 Optimisation de la microstructure : conception de précision pilotée par l'IA
 - 7.5.2 Surveillance des performances en temps réel : perception de haute précision de l'IIoT
 - 7.5.3 Prévision des pannes et maintenance intelligente : application collaborative de l'IA et de l'IIoT
 - 7.5.4 Optimisation des processus et fabrication intelligente : collaboration efficace entre IA et IIoT
- L'IIoT surveille la température de cémentation en temps réel (850-950°C, écart $\pm 1,5^{\circ}\text{C}$) pour optimiser la qualité de la couche de cémentation.
- 7.5.5 La première année de l'IA dans l'industrie chinoise du tungstène
 - 7.5.5.1 L'importance pratique du concept de « première année de l'IA dans l'industrie chinoise du tungstène »
 - 7.5.5.2 Importance du traitement à haute entropie du carbure cimenté
 - 7.5.5.3 L'importance du dosage des nuances de carbure
- 7.5.6 Perspectives d'avenir et défis de l'amélioration des performances du carbure cimenté
- 7.6 Normes nationales et internationales pertinentes

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

Références

Calendrier

L'équilibre entre dureté et ténacité du carbure cimenté : principaux paramètres de performance

Facteurs affectant la taille des grains : effet sur l'équilibre entre la dureté et la ténacité du carbure cimenté

Facteurs influençant l'optimisation de la teneur en phase liante pour l'équilibre dureté/ténacité du carbure cimenté

Principaux paramètres de performance du carbure cimenté en termes de résistance à la fatigue et de résistance aux chocs

Facteurs affectant la croissance des fissures sur la résistance à la fatigue du carbure cimenté

Facteurs affectant la ténacité aux chocs du carbure cimenté

Principaux paramètres de performance du mécanisme de rupture du carbure cimenté

Facteurs affectant l'usure et la défaillance du carbure cimenté

Facteurs affectant la fracture et l'écaillage du carbure cimenté

Principaux paramètres de performance de l'amélioration des performances du carbure cimenté

Affinage du grain et additifs : facteurs influençant l'amélioration des performances du carbure cimenté

Facteurs affectant le renforcement de surface du carbure cimenté et l'amélioration des performances

appendice

Quelle est la relation Hall-Petch ?

Qu'est-ce que le carbure cimenté à structure à gradient ?

Différents concepts et fonctions de la carburation au carbure cimenté

Cémentation et décarburation du carbure cimenté

Qu'est-ce que le jet de liant en carbure cimenté ?

Application du carbure cimenté dans les électrolyseurs à énergie nouvelle

Outils de coupe à grande vitesse en carbure

Fraises à boulets en carbure

Fraises en carbure

Fraise multi-dents en carbure

Foret monobloc en carbure

Outil de tournage extérieur en carbure

Fraises à engrenages en carbure

Fraise à engrenages en carbure pour éolienne

GB/T 18376-2001 Méthode d'essai de performance du carbure cimenté

GB/T 230.1-2001 Essai de dureté Rockwell pour les matériaux métalliques

Partie 1 : Méthodes d'essai (échelle A, B, C)

GB/T 230.2-2001 Essai de dureté Rockwell pour matériaux métalliques Partie 2 : Vérification et étalonnage des duromètres

GB/T 230.3-2001 Essai de dureté Rockwell des matériaux métalliques Partie 3 : Étalonage des blocs de dureté standard

GB/T 3848-2001 Méthode de détermination de la masse volumique du carbure cimenté

GB/T 3850-2001 Méthode de détermination de la résistance à la flexion du carbure cimenté

GB/T 3851-2001 Méthode de détermination de la ténacité à la rupture du carbure cimenté

GB/T 9097-2001 Méthode de détermination des propriétés magnétiques du carbure cimenté

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

Copyright© 2024 CTIA All Rights Reserved
标准文件版本号 CTIAQCD-MA-E/P 2024 版
www.ctia.com.cn

电话/TEL: 0086 592 512 9696
CTIAQCD-MA-E/P 2018-2024V
sales@chinatungsten.com

GB/T 3849-2008 Méthode d'essai pour la dureté Vickers du carbure cimenté
GB/T 7997-2010 Méthode d'essai de la ténacité à la rupture du carbure cimenté
GB/T 3488-2008 Méthode d'essai de la microstructure du carbure cimenté
ISO/TR 19041:2015 Rapport technique sur l'inspection de la microstructure du carbure cimenté : Guide supplémentaire pour l'évaluation des défauts
ISO 4884:2019 Méthode de détermination des propriétés magnétiques du carbure cimenté
ISO 3369:2006 Méthode de détermination de la masse volumique du carbure cimenté
ISO 28079:2009 Méthode de détermination de la ténacité à la rupture du carbure cimenté
ISO 3878:1983 Méthode d'essai pour la dureté Rockwell du carbure cimenté (échelle HRA)
ISO 3326:2013 Méthode d'essai pour la dureté Vickers du carbure cimenté
ISO 4489-2:2020 Méthode d'essai pour la résistance à la flexion du carbure cimenté Partie 2 : Conditions de haute température
ISO 4489:2010 Méthode de détermination de la résistance à la flexion du carbure cimenté
ISO 4499-3:2016 Carbure cimenté — Examen de la microstructure Partie 3 : Évaluation de la porosité, des inclusions, du carbone libre et de la phase éta
ISO 4499-2:2008 Carbure cimenté — Examen de la microstructure Partie 2 : Méthode de détermination de la taille des grains
ISO 4499-1:2006 Carbure cimenté — Examen de la microstructure Partie 1 : Orientations générales
ISO 3847:2005 Méthodes de préparation des éprouvettes en carbure cimenté
ISO 3850:2018 Terminologie du carbure cimenté
ISO 3850:2018 Métal dur — Vocabulaire
GB/T 4295-2008 Méthode d'évaluation des défauts microstructuraux dans le carbure cimenté
GB/T 5249-2008 Spécification générale pour la préparation d'échantillons de carbure cimenté
ISO 28079:2009 Essai de ténacité à la rupture d'éprouvettes en carbure cimenté en forme de paume
Métaux durs — Test de ténacité Palmqvist
ISO 6507-1:2018 Essai de dureté Vickers pour les matériaux métalliques
Matériaux métalliques — Essai de dureté Vickers
ISO 6507-1:2018 Matériaux métalliques — Essai de dureté Vickers Partie 1 : Méthode d'essai
ISO 6507-2:2018 Matériaux métalliques — Essai de dureté Vickers Partie 2 : Vérification et étalonnage des duromètres
ISO 6507-3:2018 Matériaux métalliques — Essai de dureté Vickers Partie 3 : Étalons d'étalonnage
ISO 3327:2009 Méthode d'essai de la résistance à la compression du carbure cimenté
Métaux durs — Détermination de la résistance à la rupture transversale
Métaux durs — Essais d'abrasion pour les métaux durs
Méthode d'essai standard ASTM B611-13 pour la résistance à l'usure sous haute contrainte des matériaux durs
Méthode d'essai d'impact sur éprouvette entaillée ASTM E23-18
Méthodes d'essai standard pour les essais d'impact sur barres entaillées de matériaux métalliques
Méthode d'essai d'abrasion sur sable sec/roue en caoutchouc ASTM G65-16
Méthode d'essai standard pour mesurer l'abrasion à l'aide d'un appareil à roue sèche en sable/caoutchouc
EN ISO 6507-1:2018 Essai de dureté Vickers
Matériaux métalliques — Essai de dureté Vickers — Partie 1 : Méthode d'essai
EN ISO 18265:2013 Matériaux métalliques — Conversion entre dureté et résistance

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

Matériaux métalliques — Conversion des valeurs de dureté

EN ISO 6892-1:2019 Essais de traction des matériaux métalliques

Matériaux métalliques — Essai de traction — Partie 1 : Méthode d'essai à température ambiante

CTIA GROUP LTD

30 Years of Cemented Carbide Customization Experts

Core Advantages

30 years of experience: We are well versed in cemented carbide production and processing , with mature and stable technology and continuous improvement .

Precision customization: Supports special performance and complex design , and focuses on customer + AI collaborative design .

Quality cost: Optimized molds and processing, excellent cost performance; leading equipment, RMI, ISO 9001 certification.

Serving Customers

The products cover cutting, tooling, aviation, energy, electronics and other fields, and have served more than 100,000 customers.

Service Commitment

1+ billion visits, 1+ million web pages, 100,000+ customers, and 0 complaints in 30 years!

Contact Us

Email : sales@chinatungsten.com

Tel : +86 592 5129696

Official website : www.ctia.com.cn

WeChat : Follow "China Tungsten Online"



COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

Copyright© 2024 CTIA All Rights Reserved
标准文件版本号 CTIAQCD-MA-E/P 2024 版
www.ctia.com.cn

电话/TEL: 0086 592 512 9696
CTIAQCD-MA-E/P 2018-2024V
sales@chinatungsten.com