

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

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 internationale, 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 de 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 de 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



Chapitre 3 : Propriétés physiques et chimiques du carbure cimenté

Le carbure cimenté de tungstène est devenu le matériau de base des outils de coupe, des pièces résistantes à l'usure, des équipements miniers, de l'aérospatiale, des équipements chimiques, des centrales nucléaires et des équipements sous-marins grâce à ses excellentes propriétés physiques et chimiques. Ces propriétés comprennent des propriétés mécaniques (dureté, ténacité, résistance à la compression, résistance à la flexion), thermiques (conductivité thermique, coefficient de dilatation thermique, stabilité à haute température, résistance aux chocs thermiques), chimiques (résistance à la corrosion, résistance à l'oxydation) et électriques et magnétiques (conductivité, magnétisme de la phase Co), qui découlent de la rigidité de la liaison covalente du carbure de tungstène (WC) et de la synergie plastique de la phase de liaison cobalt (Co) ou nickel (Ni).

Ce chapitre analyse chaque propriété physico-chimique, les méthodes d'inspection et d'essai, les facteurs affectant divers aspects des performances et les cas d'application étendus. Il explore en profondeur les fondements théoriques, la technologie d'essai, le mécanisme de régulation, l'adaptabilité environnementale et les performances en conditions de travail. Grâce à des modèles théoriques détaillés, des données expérimentales précises, des cas inter-domaines riches et une analyse d'impact sur les performances, ce chapitre révèle le mécanisme inhérent aux propriétés physico-chimiques, offrant ainsi une référence complète pour l'optimisation des performances, l'adaptation aux conditions de travail extrêmes et la recherche interdisciplinaire sur le carbure cimenté.

3.1 Propriétés mécaniques du carbure cimenté

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

Les propriétés mécaniques sont la pierre angulaire de la fiabilité du carbure cémenté dans les environnements soumis à de fortes charges, aux chocs, à l'usure et aux contraintes complexes. Il est largement utilisé dans la découpe, l'exploitation minière, l'emboutissage, l'aviation et le forage en haute mer. Cette section analyse la dureté, la ténacité, la résistance à la compression et à la flexion une par une, et ajoute de nouvelles méthodes d'inspection et d'essai, ainsi que des facteurs d'influence.

3.1.1 Dureté du carbure cémenté

La dureté désigne la capacité d'un matériau à résister aux pressions ou aux rayures d'objets extérieurs sur sa surface. C'est l'un des indicateurs importants pour mesurer ses propriétés mécaniques. Elle reflète généralement la résistance mécanique, la résistance à l'usure et la résistance à la déformation d'un matériau, et se caractérise souvent par sa capacité à résister à la compression, au cisaillement ou à la déformation plastique. Les méthodes de mesure courantes incluent la dureté Brinell (HB), la dureté Rockwell (HR), la dureté Vickers (HV) et la dureté Shore (HS). Leurs valeurs sont calculées en fonction du type de pénétrateur (bille d'acier ou diamant, par exemple), de la taille de la charge et de la surface d'indentation (ISO 6507, ASTM E10). Par exemple, la dureté Vickers du carbure cémenté est généralement comprise entre 1200 et 2400 HV, selon la granulométrie et la teneur en phase liante. La dureté est étroitement liée à la microstructure du matériau (granulométrie, composition des phases, par exemple) et au traitement thermique, et constitue un critère essentiel pour le choix des matériaux et l'évaluation de leur durabilité.

La dureté Vickers (HV) du carbure cémenté est de $1\ 500$ à $2\ 500 \pm 30$, dépassant largement celle de l'acier rapide (HV 800 à 1 000), de la céramique (HV 1 200 à 1 800) et des alliages de titane (HV 300 à 400), ce qui est au cœur de sa résistance à l'usure. Cette dureté provient du réseau de liaisons covalentes du WC (énergie de liaison WC $6,0\ \text{eV} \pm 0,2\ \text{eV}$, longueur de liaison $2,0\ \text{Å} \pm 0,05\ \text{Å}$), et sa structure cristalline hexagonale ($P6m^2$, module de Young $700\ \text{GPa} \pm 10\ \text{GPa}$) lui confère une résistance à la déformation plastique. La dureté du carbure cémenté contenant 10 % de Co est HV 1800 ± 30 , et celle du carbure cémenté contenant 20 % de Co tombe à HV 1400 ± 30 , car la douceur de la phase Co (HV 300 - 400, structure FCC cubique à faces centrées) réduit la résistance à la compression.

la dureté du carbure cémenté est exceptionnelle.

Français À 600°C , la dureté du carbure cémenté contenant 6% de Co maintient HV 1500 ± 30 , chute à HV 1200 ± 20 à 800°C et chute à HV 1000 ± 30 à 1000°C , ce qui est meilleur que l'acier rapide (baissé à HV 500 à 600°C) et la céramique (baissé à HV 800 à 1000°C). L'ajout de Cr_3C_2 (0,5%1%) augmente la dureté à HV 1900 - 2200 ± 50 par renforcement de la solution solide (rayon atomique du Cr $1,28\ \text{Å}$, déformation du réseau $<2\% \pm 0,2\%$). Par exemple, un outil en carbure cémenté (HV 1900) contenant 8 % de Co et 0,5 % de Cr_3C_2 présente une quantité d'usure de $<0,1\ \text{mm} \pm 0,02\ \text{mm}$ et une durée de vie de 15 heures ± 1 heure dans la coupe à grande vitesse de l'acier inoxydable (résistance à la traction $>1000\ \text{MPa}$, vitesse de coupe 200 m/min, coefficient de frottement $<0,3 \pm 0,05$), ce qui est meilleur que les outils en céramique (durée de vie <5 heures, quantité

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

d'usure >0,3 mm).

L'impact de l'environnement sur la dureté nécessite une attention particulière.

Français Dans un environnement chaud et humide (40°C, 90% d'humidité, 168 heures), une micro-corrosion de la phase Co est induite (perte de poids <0,1 mg/cm² ± 0,02 mg/cm², profondeur de corrosion <1µm±0,2µm), et la dureté diminue de <2%±0,5%; dans un environnement extrêmement froid (40°C), la dureté augmente légèrement de 1%±0,3% en raison de la fragilisation de la phase Co (la déformation plastique diminue de <3%±0,3%); à haute pression (>100 MPa, 5000 m de profondeur), il n'y a pas de changement significatif (diminution <0,5%±0,1%); le rayonnement (énergie nucléaire, 10⁴Gy, rayons γ) induit des défauts ponctuels, et la dureté diminue de <1%±0,2%.

Le carbure cémenté contenant du Ni (12 % Ni, HV 1700±30) est plus stable en milieu marin (salinité 3,5 %, pH 8, Cl⁻19 g/L), avec une baisse de dureté inférieure à 1 %. En pratique, les rouleaux en carbure cémenté contenant 6 % de Co présentent une profondeur d'usure inférieure à 0,05 mm±0,01 mm et une durée de vie supérieure à 300 heures±20 heures dans l'exploitation minière (granit, dureté de la roche > 1000 MPa, fréquence d'impact > 1000 fois/min), ce qui est supérieur à celui de l'acier rapide (durée de vie inférieure à 50 heures).

L'optimisation de la dureté nécessite un compromis avec la ténacité.

Français L'ajout de TiC (10%15%, dureté 20 GPa±1 GPa) augmente la dureté à HV 2000±50, tout en réduisant la densité (à 12 g/cm³ ± 0,1 g/cm³), ce qui convient aux pièces aéronautiques légères, telles que les moules d'aubes de turbine (charge > 2000 MPa, tolérance de déformation < 0,01 mm). Lors de l'emboutissage composite (600 °C, fréquence > 10⁴ fois/heure), la rugosité de surface du moule en carbure cémenté contenant 15 % de TiC est Ra<0,1 µm±0,02 µm, et la durée de vie est augmentée de 40 %±5 %, ce qui est meilleur que les moules en acier (Ra>0,5 µm, durée de vie < 2000 heures). La comparaison inter-domaines montre que la dureté du carbure cémenté est meilleure que celle de l'acier à haute résistance (HV 600800) et de l'alliage de titane (HV 300400), mais inférieure à celle du diamant (HV > 8000).

3.1.1.1 Méthode d'expression de la dureté

Il existe de nombreuses façons d'exprimer la dureté, adaptées à différents scénarios de test et comparaisons de matériaux :

Dureté Vickers (HV)

La dureté Vickers (HV) est une méthode standard pour mesurer avec précision la dureté des matériaux. Elle utilise un pénétrateur pyramidal en diamant (angle au sommet de 136°) pour enfoncer la surface du matériau sous une charge spécifiée (généralement de 5 à 100 kgf, la plage pouvant être étendue de 1 à 120 kgf). Après 10 à 15 secondes de maintien, la longueur diagonale de l'empreinte (d, en mm) est mesurée pour calculer la dureté. La formule est : $HV = 1,8544 \times F / d^2$, où F est la charge appliquée (kgf), d la longueur diagonale moyenne de l'empreinte (mm), et le

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

résultat est exprimé en kgf/mm^2 , généralement désigné directement comme valeur HV (ISO 6507-1:2018).

La dureté Vickers s'applique à une grande variété de matériaux, notamment le carbure cémenté, l'acier, la céramique et les matériaux en couches minces, en raison de sa faible indentation (diamètre de 0,01 à 1 mm), de sa grande précision (erreur < 5 %) et de sa large plage de test (HV de 10 à 3 000 et plus). Par exemple, la HV du carbure cémenté conventionnel est de 1 200 à 2 000, tandis que celle du carbure cémenté nanométrique (grains de 0,05 à 0,2 μm) peut atteindre 2 000 à 2 400 (Journal of Materials Science 2025). Son avantage est de pouvoir tester de petites zones (comme des revêtements) ou des feuilles minces (épaisseur > 0,1 mm), mais la durée du test est longue et les exigences de planéité de surface sont élevées ($R_a < 0,8 \mu\text{m}$, ITIA 2024).

Dureté Rockwell (HRC/HRB)

La dureté Rockwell (HRC/HRB) est une méthode courante de mesure de la dureté des matériaux. Le pénétrateur (cône en diamant ou bille d'acier) est enfoncé dans le matériau sous une charge initiale (10 kgf) et une charge totale (60-150 kgf). La valeur de dureté est déterminée en mesurant la différence de profondeur d'indentation (ASTM E18-22). Cette méthode se caractérise par des tests rapides, une faible indentation et une utilisation simple, et est largement utilisée dans les matériaux métalliques.

HRC : Utiliser un pénétrateur à cône diamant (angle au sommet 120°) d'une charge totale de 150 kgf, adapté aux matériaux de dureté élevée (tels que l'acier trempé et le carbure cémenté). La valeur HRC est calculée selon la formule suivante : $HRC = 100 - (h/0,002)$, où h est la profondeur d'indentation (mm). La plage HRC est généralement comprise entre 20 et 70 ; par exemple, pour le carbure cémenté, HRC est de 60-70, ce qui équivaut à une dureté Vickers HV de 1 200-2 400.

HRB : Utiliser un pénétrateur à bille d'acier de 1/16 pouce avec une charge totale de 100 kgf, adapté aux matériaux tendres (tels que l'acier recuit et les alliages de cuivre). La formule de calcul de la valeur HRB est la suivante : $HRB = 130 - (h/0,002)$, comprise entre 20 et 100. Par exemple, la valeur HRB de l'acier recuit est d'environ 70 à 90 (ITIA 2024).

L'avantage de la dureté Rockwell est qu'elle peut être lue directement avec une grande précision (erreur < 3 %), mais elle ne convient pas aux matériaux minces ou aux petites surfaces (ISO 6508-1:2016).

Dureté Brinell (HB)

La dureté Brinell (HB) est une méthode de mesure de la dureté d'un matériau. On enfonce une bille d'acier trempé ou un pénétrateur en carbure de tungstène (généralement de 2,5, 5 ou 10 mm de diamètre) à la surface du matériau sous une charge spécifiée (F, généralement de 500 à 3 000 kgf), on la maintient pendant un certain temps (10 à 30 secondes), puis on mesure le diamètre d'indentation (d, en mm) pour calculer la dureté. La formule est : $HB = (2F) / (\pi D(D - \sqrt{D^2 - d^2}))$, où D est le diamètre du pénétrateur (mm), F est la charge (kgf), d est le diamètre d'indentation (mm),

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

et le résultat est exprimé en kgf / mm^2 (ASTM E10-18).

La dureté Brinell convient aux matériaux tendres ou moyennement durs (tels que l'acier, la fonte et les métaux non ferreux) et se situe généralement entre HB 30 et 650. Par exemple, la dureté Brinell de l'acier non trempé est d'environ 120 à 200, tandis que le carbure cémenté ne convient généralement pas à cette méthode en raison de sa dureté élevée (HV 1200 à 2400) (ITIA 2024). Son avantage réside dans sa grande surface d'empreinte, reflétant les performances moyennes du matériau, et elle convient aux matériaux hétérogènes, mais pas aux pièces minces ni aux matériaux très durs (l'erreur est d'environ 3 à 5 %, selon la norme ISO 6506-1:2014).

dureté de Mohs

La dureté de Mohs est une échelle relative permettant de mesurer qualitativement la dureté des matériaux. Elle a été proposée par le minéralogiste allemand Friedrich Mohs en 1812 pour évaluer la dureté en comparant la résistance du matériau à la rayure. La méthode utilise 10 minéraux standards comme référence, dont la dureté est graduée de 1 (le plus tendre) à 10 (le plus dur) : 1 talc, 2 gypse, 3 calcite, 4 fluorite, 5 apatite, 6 orthose, 7 quartz, 8 topaze, 9 corindon, 10 diamant. Lors de l'essai, grattez la surface du matériau avec un échantillon standard. Si une marque subsiste, la dureté du matériau est inférieure à celle de l'échantillon standard.

La dureté Mohs est simple et intuitive, applicable aux minéraux et à certains matériaux techniques. Cependant, sa précision est faible et il ne s'agit que d'une valeur relative. Par exemple, la dureté Mohs du carbure cémenté est d'environ 9-9,5, proche de celle du corindon et bien supérieure à celle de l'acier (environ 5-6) (ITIA 2024). Ses limites sont l'impossibilité de quantifier la différence de dureté (par exemple, la différence entre 9 et 10 est bien supérieure à celle entre 1 et 2) et son inadéquation aux tests de matériaux hétérogènes ou de couches minces (l'erreur est d'environ $\pm 0,5$).

Lors de la conversion, veuillez tenir compte de la relation non linéaire : $\text{HV} \approx 10 \cdot \text{HRC} + 900$ (erreur $< 5\%$), HB et erreur de conversion Mohs $> 10\%$. En pratique, HV est la méthode principale et HRC/HS la méthode auxiliaire pour garantir une constance des performances $> 95\% \pm 2\%$.

3.1.1.2 Méthode d'essai de dureté

Les tests de dureté garantissent la précision des mesures en :

Essai de dureté Vickers (ISO 3878)

L'alliage dur contenant 10 % de Co (HV 1800 \pm 30) nécessite une charge de 10 kg, une diagonale d'indentation de 2030 $\mu\text{m} \pm 0,5 \mu\text{m}$, un grossissement au microscope de 400 fois \pm 10 fois et une erreur $< 1\% \pm 0,2\%$. L'environnement requiert une température de 25 $^{\circ}\text{C} \pm 2^{\circ}\text{C}$, une humidité $< 60\% \pm 5\%$ et une surface de l'échantillon Ra $< 0,2 \mu\text{m} \pm 0,05 \mu\text{m}$. Par exemple, le moule contenant 15 % de TiC (HV 2000 \pm 50) passe le test Vickers pour garantir une précision d'emboutissage $< 0,01 \text{ mm}$.

Essai de dureté Rockwell (ISO 6508)

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

L'alliage dur contenant 6 % de cobalt (HRC 90 ± 1) adopte une échelle HRC, une précharge de 10 kg $\pm 0,1$ kg, une charge principale de 150 kg $\pm 0,1$ kg, un maintien de 5 s $\pm 0,5$ s et une erreur $< 2 \% \pm 0,5 \%$. Adapté aux chantiers, notamment pour les outils contenant 8 % de cobalt (HRC 89 ± 1).

Testeur de dureté portable (Leeb, ASTM A956)

Le carbure cémenté contenant 12 % de cobalt (HS 85 ± 2) présente une énergie d'impact de 11 N·mm $\pm 0,5$ N·mm avec une erreur de $< 3 \% \pm 0,5 \%$. Adapté aux sites miniers, notamment pour les rouleaux (HS 87 ± 2).

Essai de dureté par ultrasons (ASTM A1038)

Le carbure cémenté contenant 8 % de Co (HV 1900 ± 50) utilise une impédance de contact ultrasonique avec une fréquence de 20 kHz $\pm 0,5$ kHz et une erreur de $< 2 \% \pm 0,5 \%$, ce qui convient aux formes complexes telles que les moules d'aviation.

Test de nanoindentation

Le carbure cémenté contenant 10 % de Co (dureté 20 GPa ± 1 GPa) utilise un pénétrateur Berkovich avec une charge de 10 mN $\pm 0,1$ mN, une profondeur d'indentation de < 200 nm ± 10 nm et une erreur de $< 5 \% \pm 1 \%$, ce qui convient à la détection de revêtement.

Le test nécessite un étalonnage (erreur standard $< 1 \%$) et l'absence de vibrations (accélération $< 0,1$ m/s²). Par exemple, un moule contenant 15 % de TiC est testé par Vickers et nanoindentation pour garantir une durée de vie supérieure à 6 000 heures ± 500 heures.

3.1.1.3 Facteurs affectant la dureté

Composition du carbure cémenté

Français Lorsque la teneur en Co augmente (6 % à 20 %), la dureté diminue de HV 2000 ± 50 à HV 1400 ± 30 , car la douceur de la phase Co (HV 300 400) réduit la résistance à la déformation. L'ajout de TiC (10 % 15 %) augmente la dureté à HV 2000 ± 50 et de TaC (1 % 2 %) à HV 1900 ± 50 , en raison du renforcement de la solution solide (déformation du réseau $< 2 \% \pm 0,2 \%$). La dureté de Cr₃C₂ (0,5 % 1 %) atteint HV 2200 ± 50 , car les atomes de Cr inhibent le glissement des joints de grains (le coefficient de frottement diminue à $< 0,2 \pm 0,05$).

Procédé de fabrication de carbure cémenté

La température de frittage ($1400-1500^{\circ}\text{C} \pm 10^{\circ}\text{C}$) affecte la densité de la phase WC ($> 99 \% \pm 0,1 \%$), et une température trop élevée ($> 1550^{\circ}\text{C}$) provoque la volatilisation de la phase Co (perte $< 5 \% \pm 1 \%$), et la dureté diminue de $3 \% 5 \% \pm 1 \%$. Le pressage isostatique à chaud (HIP, 100 MPa ± 5 MPa) élimine les pores (porosité $< 0,1 \% \pm 0,02 \%$) et la dureté augmente de $2 \% \pm 0,5 \%$.

Environnement

Une température élevée ($600 - 1000^{\circ}\text{C}$) réduit l'énergie de liaison du WC (la longueur de liaison augmente de $0,1 \text{ \AA} \pm 0,02 \text{ \AA}$) et la dureté diminue de $10 \% 30 \% \pm 2 \%$. La chaleur humide (40°C , 90%

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

d'humidité) provoque une corrosion du Co (perte de poids $<0,1 \text{ mg/cm}^2$) et la dureté diminue de $<2\% \pm 0,5\%$. Un froid extrême (40°C) provoque une fragilisation du Co et la dureté augmente de $1\% \pm 0,3\%$. Le rayonnement (10^4 Gy) provoque des défauts et la dureté diminue de $<1\% \pm 0,2\%$.

État de surface du carbure cimenté

La rugosité de surface ($R_a > 0,4 \mu\text{m}$) réduit la précision de l'indentation (erreur $> 2\% \pm 0,5\%$) ; le revêtement (tel que Al_2O_3 , $5 \mu\text{m} \pm 1 \mu\text{m}$) augmente la dureté de surface à HV 2200 ± 50 en raison de la contrainte de compression ($> 500 \text{ MPa} \pm 50 \text{ MPa}$).

Par exemple, un outil contenant 8 % de Co et 0,5 % de Cr_3C_2 (HV 1900 ± 50 , procédé HIP) conserve une dureté de HV 1850 ± 30 et une durée de vie de $> 15 \text{ heures} \pm 1 \text{ heure}$ en coupe à chaud humide (40°C , 90 % d'humidité). L'optimisation nécessite un procédé à faible teneur en Co (6 % à 8 %) et à haute densité.

3.1.2 Ténacité du carbure cimenté

La ténacité du carbure cimenté se réfère à sa capacité à résister à la propagation des fissures et à la fracture. C'est un indicateur de performance clé pour mesurer la résistance aux chocs et la fiabilité des matériaux. Comme le carbure cimenté utilise du carbure de tungstène (WC) comme phase dure et du cobalt (Co) ou du nickel (Ni) comme phase de liaison, sa ténacité dépend principalement de la granulométrie, de la teneur en phase de liaison, de la microstructure et du procédé de préparation.

Définition de la ténacité à la rupture

La ténacité à la rupture (KIC) est la capacité du carbure cimenté à résister à la propagation des fissures, généralement exprimée en $\text{MPa} \cdot \text{m}^{1/2}$, reflétant la résistance à la rupture du matériau lorsqu'il est soumis à un facteur d'intensité de contrainte à la pointe de la fissure (ASTM E399).

Plage de ténacité à la rupture

Français Le carbure cimenté conventionnel (taille de grain $1-5 \mu\text{m}$) a un KIC de $8-15 \text{ MPa} \cdot \text{m}^{1/2}$, selon la teneur en Co. Le carbure cimenté à grains fins ($0,5-1 \mu\text{m}$) et ultrafins ($0,2-0,5 \mu\text{m}$) a un KIC de $7-12 \text{ MPa} \cdot \text{m}^{1/2}$, et le chemin de propagation des fissures est plus compliqué en raison de l'augmentation de la surface limite des grains (Journal of the Chinese Society of Nonferrous Metals 2024). Le carbure cimenté à l'échelle nanométrique ($0,05-0,2 \mu\text{m}$) a un KIC de $6-9 \text{ MPa} \cdot \text{m}^{1/2}$, avec une ténacité et une concentration de contraintes plus faibles en raison des grains fins (ITIA 2024).

Facteurs affectant la ténacité à la rupture

Teneur en phase liante

Lorsque la teneur en Co augmente de 6 % à 15 %, le KIC peut être augmenté de 20 à 30 % (de $8 \text{ MPa} \cdot \text{m}^{1/2}$ à 10 à $12 \text{ MPa} \cdot \text{m}^{1/2}$) car le Co fournit un tampon plastique.

Taille des grains

la taille des grains est réduite de $5 \mu\text{m}$ à $0,2 \mu\text{m}$, le KIC diminue d'environ 15 à 20 %, mais la résistance à l'usure est améliorée.

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

Défauts microscopiques

La porosité ou les fissures réduisent le KIC de 5 à 10 %.

Application de la ténacité à la rupture

La ténacité à la rupture est un indicateur clé pour évaluer la résistance à l'écaillage des outils et la résistance aux chocs des moules. Par exemple, en usinage à grande vitesse (200 m/min), la durée de vie du carbure cémenté avec un $KIC > 10 \text{ MPa} \cdot \text{m}^{1/2}$ peut atteindre 2 à 3 heures (Journal of Materials Science 2025).

Définition de la résistance aux chocs

cm^2 par essai de choc Charpy ou Izod (ASTM E23).

Plage de ténacité à la rupture :

Le carbure cémenté à gros grains ($> 5 \mu\text{m}$) est de 10 à 20 J/cm^2 en raison de sa grande granulométrie et de sa distribution uniforme du Co.

Les carbures cémentés à grains fins et ultrafins sont de 5 à 12 J/cm^2 et la ténacité diminue à mesure que la taille des grains diminue.

La ténacité aux chocs du carbure cémenté de qualité nanométrique est inférieure à 5 J/cm^2 et sa résistance aux chocs est relativement faible.

Facteurs affectant la ténacité à la rupture :

Teneur en Co : Lorsque le Co augmente de 6 % à 12 %, la résistance aux chocs augmente d'environ 30 à 40 % car la phase Co améliore l'absorption d'énergie.

Procédé de frittage : le pressage isostatique à chaud (HIP) réduit la porosité et améliore la résistance aux chocs de 10 à 15 %.

Température ambiante : à basse température (-50°C), la ténacité aux chocs diminue d'environ 20 à 25 %, et les matériaux à haute teneur en Co sont plus stables.

Application : La résistance aux chocs est adaptée aux forets miniers et aux matrices d'emboutissage. Sous des impacts à haute fréquence ($> 2\,000$ fois/minute), la durée de vie du matériau, d'une résistance supérieure à 10 J/cm^2 , peut atteindre 200 à 300 heures.

Définition de la résistance à la fatigue

La ténacité à la fatigue décrit la capacité du carbure cémenté à résister à la croissance des fissures sous une charge cyclique et est généralement caractérisée par le taux de croissance des fissures de fatigue (da/dN , m/cycle) ou la limite de fatigue (MPa) (ASTM E647).

Plage de résistance à la fatigue :

La limite de fatigue du carbure cémenté conventionnel est de 800 à 1 200 MPa et le taux de croissance des fissures de fatigue est d'environ 10^{-6} - 10^{-5} m/cycle.

En raison de la concentration des contraintes aux joints de grains, la limite de fatigue du carbure cémenté à l'échelle nanométrique est réduite à 600-900 MPa et le taux d'expansion est augmenté à 10^{-5} - 10^{-4} m/cycle.

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

Facteurs affectant la ténacité à la fatigue :

Qualité de surface : rugosité de surface $Ra > 0,8 \mu\text{m}$, la durée de vie en fatigue diminue de 20 à 30 %.

Défauts : La porosité ou la phase amorphe réduit la limite de fatigue de 10 à 15 %.

Revêtement : Le revêtement PVD TiAlN peut augmenter la durée de vie en fatigue d'environ 15 à 20 % en réduisant l'initiation des fissures de surface.

Application de la ténacité à la fatigue

La résistance à la fatigue est essentielle pour les outils soumis à des charges cycliques (tels que les fraises), où la durée de vie en fatigue peut atteindre 1 000 à 1 500 heures à 10^7 cycles (500 MPa).

Définition de la ténacité thermique

La ténacité à chaud reflète la résistance aux fissures du carbure cémenté sous des cycles thermiques à haute température ou des chocs thermiques, et est généralement caractérisée par la durée de vie en fatigue thermique (nombre de cycles) ou la ténacité à la rupture à haute température (KIC, 1000°C) (ASTM E1830).

Plage de résistance thermique

La durée de vie en fatigue thermique du carbure cémenté conventionnel est de 500 à 1 000 fois (500°C) et le KIC à haute température est de 6 à $10 \text{ MPa}\cdot\text{m}^{1/2}$.

contenant du TaC ou du TiC peut atteindre 1000 à 1500 fois, et le KIC à haute température est de 7 à $12 \text{ MPa}\cdot\text{m}^{1/2}$.

Facteurs affectant la ténacité thermique

Inadéquation de dilatation thermique : L'inadéquation entre le WC ($5,2 \times 10^{-6} / \text{K}$) et le Co ($12 \times 10^{-6} / \text{K}$) entraîne une contrainte thermique et une diminution de 10 à 15 % de la ténacité.

Oxydation à haute température : gain de poids d'oxydation à $1000^\circ\text{C} > 0,1 \text{ mg}/\text{cm}^2$, ténacité thermique diminuée d'environ 20 %.

Taille des grains : les matériaux à l'échelle nanométrique présentent une contrainte thermique concentrée et leur ténacité thermique diminue d'environ 15 à 20 %.

Application de la ténacité thermique

La ténacité thermique convient à la découpe à haute température (comme les pièces de moteurs d'avion, $250 \text{ m}/\text{min}$), et la durée de vie peut atteindre 2 à 3 heures.

5. Facteurs clés affectant la résilience

Composition de la phase de liaison : l'alliage Ni ou Co-Cr remplace le Co pur, et la ténacité est améliorée de 5 à 10 % car la phase Ni a une forte résistance à la corrosion (taux de corrosion $< 0,03 \text{ mm}/\text{an}$, ASTM G31).

Microstructure : la phase η ou le carbone libre réduit la ténacité de 5 à 15 %, et le pressage isostatique à chaud (HIP) peut restaurer environ 10 % de la ténacité.

Optimisation du processus : l'ajout d'inhibiteurs de grains (tels que VC 0,2 % à 0,5 %) peut augmenter la ténacité de 5 à 8 % (ITIA 2024).

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

Français La ténacité à la rupture (K_{Ic}) du carbure cémenté est de $820 \text{ MPa}\cdot\text{m}^{1/2} \pm 0,5$, ce qui est meilleur que la céramique ($K_{Ic} 35 \text{ MPa}\cdot\text{m}^{1/2}$) et le nitrure de silicium ($K_{Ic} 68 \text{ MPa}\cdot\text{m}^{1/2}$), et légèrement inférieur à l'acier à haute résistance ($K_{Ic} 2030 \text{ MPa}\cdot\text{m}^{1/2}$), supportant des conditions d'impact élevées telles que le forage de roche et le poinçonnage. La ténacité provient de la déformation plastique de la phase Co (déformation $< 5\% \pm 0,5\%$, limite d'élasticité $> 500 \text{ MPa} \pm 20 \text{ MPa}$), dissipant l'énergie par la déflexion des fissures (angle $> 30^\circ \pm 5^\circ$) et le pontage (force de pontage $> 10 \text{ MPa} \pm 2 \text{ MPa}$). Le K_{Ic} du carbure cémenté contenant 12 % de Co est de $15 \text{ MPa}\cdot\text{m}^{1/2} \pm 0,3$, et celui du carbure cémenté contenant 6 % de Co est de $10 \text{ MPa}\cdot\text{m}^{1/2} \pm 0,2$.

La teneur en Co régule la ténacité. Lorsque Co augmente de 6 % à 20 %, K_{Ic} augmente de 8 à 18 $\text{MPa}\cdot\text{m}^{1/2} \pm 0,5$, en raison de l'absorption d'énergie améliorée (énergie dissipée $> 50 \text{ J/m}^2 \pm 5 \text{ J/m}^2$) du réseau de phase Co (épaisseur $1030 \text{ nm} \pm 2 \text{ nm}$, voir chapitre 2). L'ajout de TaC (1 % 2 %) augmente la résistance aux joints de grains ($> 50 \text{ MPa} \pm 5 \text{ MPa}$), K_{Ic} augmente à $14 \text{ MPa}\cdot\text{m}^{1/2} \pm 0,5$, et la profondeur d'extension des fissures est $< 10 \mu\text{m} \pm 2 \mu\text{m}$.

Le foret en carbure contenant 12 % de Co et 1 % de TaC a une longueur de fissure de $< 5 \mu\text{m} \pm 1 \mu\text{m}$ et une durée de vie de $> 250 \text{ h} \pm 20 \text{ h}$ dans le perçage du granit (fréquence d'impact > 2000 fois/min, charge $> 3000 \text{ MPa}$, énergie d'impact $> 100 \text{ J} \pm 10 \text{ J}$), ce qui est meilleur que celui du foret en céramique (durée de vie $< 50 \text{ h}$, fissure $> 20 \mu\text{m}$).

et environnement humide (40°C , 90% d'humidité, 168 heures), en raison de la corrosion de la phase Co (profondeur $< 2\mu\text{m} \pm 0,5\mu\text{m}$, perte de poids $< 0,2 \text{ mg/cm}^2 \pm 0,05 \text{ mg/cm}^2$), K_{Ic} diminue de 5 % 10 % $\pm 1\%$. Par grand froid (40°C), en raison de la fragilisation du Co (conversion ténacité-résistance, chute de déformation $< 3\% \pm 0,3\%$), K_{Ic} diminue de 3% $\pm 0,5\%$. Une pression élevée ($> 100 \text{ MPa}$, mer profonde) améliore la liaison des joints de grains, K_{Ic} augmente de 2 % $\pm 0,3\%$. Le rayonnement (10^4 Gy) induit des défauts de phase Co (densité de lacunes $< 10^{15} /\text{cm}^3$) et K_{Ic} diminue de $< 2\% \pm 0,3\%$.

Le carbure cémenté contenant du Ni (12 % Ni, $K_{Ic} 13 \text{ MPa}\cdot\text{m}^{1/2} \pm 0,3$) est plus stable en milieu marin (salinité 3,5 %, O_2 8 mg/L), avec une chute de K_{Ic} inférieure à 2 %. Par exemple, les outils de forage de roche contenant du Ni fonctionnent dans une mine chaude et humide (pH 6, humidité 90 %, température 40°C), avec un K_{Ic} de $12 \text{ MPa}\cdot\text{m}^{1/2} \pm 0,3$, et une augmentation de la durée de vie de 30 % $\pm 5\%$, ce qui est meilleur que les matériaux contenant du Co (réduction de la durée de vie de 10 % $\pm 2\%$).

L'optimisation de la ténacité nécessite un équilibre de la dureté. Une teneur élevée en Co ($> 15\%$) augmente K_{Ic} à $18 \text{ MPa}\cdot\text{m}^{1/2} \pm 0,5$, mais la dureté chute à $\text{HV } 1400 \pm 30$; l'ajout de NbC (0,5 % 1 %) augmente K_{Ic} à $15 \text{ MPa}\cdot\text{m}^{1/2} \pm 0,5$ en affinant le chemin de fissure (largeur de fissure $< 1 \mu\text{m} \pm 0,2 \mu\text{m}$), et la dureté reste à $\text{HV } 1800 \pm 30$.

Français Par exemple, dans l'emboutissage à haute fréquence ($> 10^4$ fois/heure, charge $> 2000 \text{ MPa}$),

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

les matrices en carbure cimenté avec 10 % de Co et 0,5 % de NbC ont une déformation $< 0,01 \text{ mm} \pm 0,002 \text{ mm}$, un taux de fissuration $< 0,5 \%$ et une durée de vie $> 6000 \text{ heures} \pm 500 \text{ heures}$, ce qui est mieux que les matrices en acier (déformation $> 0,05 \text{ mm}$, durée de vie $< 2000 \text{ heures}$). Les comparaisons inter-domaines montrent que le carbure cimenté a une meilleure ténacité que la céramique et l'alumine ($K_{Ic} < 5 \text{ MPa} \cdot \text{m}^{1/2}$), mais est inférieur à l'acier tenace en termes de ténacité aux chocs élevés ($K_{Ic} > 50 \text{ MPa} \cdot \text{m}^{1/2}$).

3.1.2.1 Méthode d'essai de ténacité

Les tests de ténacité garantissent la résistance aux fissures, les méthodes comprennent :

Poutre entaillée à un seul bord (SENB, ASTM E399)

Carbure cimenté contenant 12 % de Co ($K_{Ic} 15 \text{ MPa} \cdot \text{m}^{1/2} \pm 0,3$) pour flexion trois points, échantillon $4 \times 4 \times 20 \text{ mm} \pm 0,1 \text{ mm}$, profondeur d'entaille $2 \text{ mm} \pm 0,05 \text{ mm}$, portée $20 \text{ mm} \pm 0,1 \text{ mm}$, taux de charge $0,1 \text{ mm/min} \pm 0,01 \text{ mm/min}$, erreur $< 2 \%$ $\pm 0,5 \%$. Les exigences environnementales sont de $25 \text{ }^\circ\text{C} \pm 2 \text{ }^\circ\text{C}$ et d'humidité $< 60 \%$ $\pm 5 \%$.

Essai d'entaille en chevron (ASTM E1304) : Le carbure cimenté contenant 6 % de Co ($K_{Ic} 10 \text{ MPa} \cdot \text{m}^{1/2} \pm 0,2$) utilise une entaille en V, échantillon $5 \times 5 \times 25 \text{ mm} \pm 0,1 \text{ mm}$, taux de charge $0,05 \text{ mm/min} \pm 0,005 \text{ mm/min}$, erreur $< 3 \%$ $\pm 0,5 \%$, adapté aux petits échantillons.

Essai de ténacité aux chocs (ISO 148)

L'alliage dur contenant 15 % de Co (énergie d'impact $> 20 \text{ J} \pm 2 \text{ J}$) a été impacté par Charpy, avec un échantillon de $10 \times 10 \times 55 \text{ mm} \pm 0,1 \text{ mm}$, une énergie de pendule de $300 \text{ J} \pm 5 \text{ J}$ et une erreur de $< 5 \%$ $\pm 1 \%$, ce qui convient aux tests d'outils miniers.

Simulation de la mécanique de la rupture : une analyse par éléments finis (ANSYS, taille de maille $< 0,1 \text{ mm}$, erreur d'extension de fissure $< 0,05 \text{ mm}$) a été utilisée pour le carbure cimenté contenant 10 % de Co pour prédire K_{Ic} (erreur $< 5 \%$ $\pm 1 \%$), ce qui convient à une analyse de contraintes complexes.

Analyse des microfissures

contenant du TaC (profondeur de fissure $< 10 \text{ } \mu\text{m} \pm 2 \text{ } \mu\text{m}$) a été évalué à l'aide d'un microscope électronique à balayage (MEB, résolution $< 5 \text{ nm} \pm 1 \text{ nm}$) (erreur $< 5 \%$ $\pm 1 \%$).

Par exemple, un foret contenant 12 % de Co et 1 % de TaC passe le test SENB ($K_{Ic} 14 \text{ MPa} \cdot \text{m}^{1/2} \pm 0,5$), garantissant une durée de vie aux chocs de $> 250 \text{ h} \pm 20 \text{ h}$ et une longueur de fissure vérifiée par SEM de $< 5 \text{ } \mu\text{m} \pm 1 \text{ } \mu\text{m}$.

3.1.2.2 Aperçu des facteurs affectant la ténacité

La résilience est affectée par :

Élément

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

Français L'augmentation de la teneur en Co de 6 % à 20 % augmente K_{Ic} de 8 à 18 $MPa \cdot m^{1/2} \pm 0,5$ en raison de la plasticité de la phase Co (module de cisaillement 80 $GPa \pm 5 GPa$) qui améliore la dissipation des fissures (énergie $> 50 J/m^2 \pm 5 J/m^2$). La substitution de Ni au Co (12 % Ni, K_{Ic} 13 $MPa \cdot m^{1/2} \pm 0,3$) réduit la ténacité en raison de la faible plasticité du Ni (déformation $< 4 \% \pm 0,5 \%$). L'ajout de TaC (1 % 2 %) augmente K_{Ic} à 14 $MPa \cdot m^{1/2} \pm 0,5$ en raison du renforcement des joints de grains (force de liaison $> 50 MPa \pm 5 MPa$).

Technologie

Le temps de frittage (24 $h \pm 0,1 h$, $1450^\circ C \pm 10^\circ C$) augmente l'uniformité de la phase Co (erreur de distribution $< 5\% \pm 1\%$) et K_{Ic} augmente de $5\% \pm 1\%$. Une température trop élevée ($> 1550^\circ C$) provoque la volatilisation du Co et K_{Ic} diminue de $3\% \pm 1\%$. Le HIP (100 $MPa \pm 5 MPa$) réduit les défauts (porosité $< 0,1\% \pm 0,02\%$) et K_{Ic} augmente de $3\% \pm 0,5\%$.

Environnement

En cas de chaleur humide ($40^\circ C$, 90% d'humidité), K_{Ic} diminue de $5\% \pm 1\%$ en raison de la corrosion du Co (perte de poids $< 0,2 mg/cm^2$) ; en cas de froid extrême ($40^\circ C$), K_{Ic} diminue de $3\% \pm 0,5\%$ en raison de la fragilisation du Co ; en cas de haute pression ($> 100 MPa$), K_{Ic} augmente de $2\% \pm 0,3\%$ en raison d'une liaison renforcée ; en cas de rayonnement ($10^4 Gy$), K_{Ic} diminue de $< 2\% \pm 0,3\%$ en raison de défauts.

État de stress

Lorsque la fréquence d'impact (> 2000 fois/min) induit des fissures de fatigue (longueur $> 5 \mu m \pm 1 \mu m$), K_{Ic} diminue de $5 \% \pm 1 \%$; sous charge statique ($< 3000 MPa$), K_{Ic} est stable.

Un trépan contenant 12 % de Co et procédé HIP (K_{Ic} 15 $MPa \cdot m^{1/2} \pm 0,3$) est exploité dans une mine chaude et humide ($40^\circ C$, 90 % d'humidité), K_{Ic} est maintenu à 14 $MPa \cdot m^{1/2} \pm 0,3$, et la durée de vie est > 250 heures ± 20 heures. L'optimisation nécessite un ajout élevé de Co (12 % 15 %) et de TaC.

3.1.3 Résistance du carbure cimenté

La résistance du carbure cimenté désigne sa capacité à résister à la déformation ou à la fracture sous l'effet de forces externes. C'est un indicateur important pour mesurer la capacité portante et la durabilité du matériau. Comme le carbure cimenté utilise du carbure de tungstène (WC) comme phase dure et du cobalt (Co) ou du nickel (Ni) comme phase de liaison, sa résistance dépend de la granulométrie, de la teneur en phase de liaison et de la microstructure. Voici les principaux types de résistance du carbure cimenté et leurs descriptions détaillées.

3.1.3.1 Résistance à la rupture transversale (TRS)

Définition

La résistance à la flexion est la capacité du carbure cimenté à résister à la rupture lors d'un essai de flexion en trois ou quatre points. Elle est mesurée en MPa et reflète la capacité portante du matériau

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

sous contrainte complexe.

Portée

Le carbure cémenté conventionnel (taille de grain 1-5 μm) est de 1800-2500 MPa et la teneur en Co est de 6%-15%.

Le carbure cémenté à grains fins (0,5-1 μm) et ultrafins (0,2-0,5 μm) est de 1700-2200 MPa.

Le carbure cémenté de taille nanométrique (0,05-0,2 μm) a une résistance de 1600 à 1900 MPa, mais sa résistance est réduite en raison de la concentration de contraintes aux joints de grains.

Caractéristiques de performance

Français La résistance à la flexion est généralement de 4000-4500 MPa \pm 100 MPa, ce qui est supérieur à celui de l'acier à haute résistance (\sim 1500 MPa), de la céramique (\sim 1000 MPa) et des alliages de titane (\sim 800 MPa), et convient aux conditions de contrainte complexes telles que l'emboutissage et l'usinage aéronautique. La phase Co inhibe la propagation des fissures (vitesse de fissure $< 10^{-5}$ m/s $\pm 10^{-6}$ m/s) par déformation plastique (déformation $< 5\% \pm 0,5\%$, contrainte de cisaillement < 100 MPa ± 10 MPa). Par exemple, la résistance à la flexion du carbure cémenté contenant 10 % de Co est de 4200 MPa ± 100 MPa, et celle du carbure cémenté contenant 15 % de Co chute à 4000 MPa ± 100 MPa.

Application

des matrices en carbure cémenté contenant 8 % de Co dans l'emboutissage de plaques d'acier automobile (charge $> 2\ 000$ MPa, fréquence $> 10^4$ fois/heure, épaisseur de plaque 2 mm $\pm 0,1$ mm) est $< 0,5\%$, et la durée de vie est $> 6\ 000$ heures ± 500 heures, ce qui est meilleur que celui des matrices en acier (taux de fracture $> 5\%$, durée de vie $< 2\ 000$ heures).

contenant 10 % de Co et 1 % de TaC a un taux de fracture de $< 1\%$ et une durée de vie de > 12 heures ± 1 heure dans la coupe d'alliage de titane aéronautique (contrainte > 2000 MPa, vitesse de coupe 150 m/min), ce qui est meilleur que les outils en céramique (durée de vie < 4 heures).

Facteurs d'influence

Contenu Co

En augmentant de 6% à 15%, la résistance chute de 4500 à 4000 MPa ± 100 MPa car la phase Co réduit la rigidité ; l'ajout de NbC (0,5%-1%) l'augmente à 4600 MPa ± 100 MPa grâce au renforcement de la solution solide (résistance aux joints de grains > 50 MPa ± 5 MPa).

Technologie

La température de frittage (1450°C $\pm 10^\circ\text{C}$) assure la liaison WC-Co (force de liaison > 50 MPa ± 5 MPa), et la résistance augmente de 3% $\pm 0,5\%$; le HIP (100 MPa ± 5 MPa) élimine les fissures (< 5 $\mu\text{m} \pm 1$ μm), et la résistance augmente de 5% $\pm 1\%$; la vitesse de refroidissement ($> 10^\circ\text{C}/\text{min}$) induit une contrainte (> 100 MPa ± 10 MPa), et la résistance diminue de 2% $\pm 0,3\%$.

Environnement

Français Température élevée (800°C) due au ramollissement du Co (limite d'élasticité diminuée de

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

<400 MPa \pm 20 MPa), diminuée à 3800 MPa \pm 100 MPa (diminuée de <10%); chaleur humide (40°C, 90% d'humidité, 168 heures) due à la corrosion du Co (perte de poids <0,1 mg/cm² \pm 0,02 mg/cm²), diminuée de 5% \pm 1%; haute pression (>100 MPa) augmentée de 2% \pm 0,3%; froid extrême (-40°C) augmenté de 3% \pm 0,5%; rayonnement (10⁴ Gy) diminué de <1% \pm 0,2%. Contenant du Cr (0,5%-1%) forme une couche protectrice de Cr₂O₃ (épaisseur <5 nm \pm 1 nm), chaleur humide diminuée de <2%.

Géométrie de l'échantillon

Une épaisseur > 4 mm \pm 0,1 mm réduit la concentration de contrainte (coefficient < 1,2 \pm 0,1) et la résistance augmente de 2 % \pm 0,3 %; les défauts de surface (Ra > 0,4 μ m) induisent des fissures, réduisant la résistance de 3 % \pm 0,5 %.

Méthodes de détection

Flexion trois points (ISO 3327)

Échantillon 4 \times 4 \times 40 mm \pm 0,1 mm, portée 20 mm \pm 0,1 mm, taux de charge 0,2 mm/min \pm 0,02 mm/min, erreur <2% \pm 0,5%, environnement 25°C \pm 2°C.

Courbure à quatre points (ASTM C1161)

L'échantillon mesure 3 \times 4 \times 45 mm \pm 0,1 mm, l'espacement des points de charge est de 10 mm \pm 0,1 mm et l'erreur est <3% \pm 0,5%, ce qui convient à une analyse de contrainte uniforme.

Contrôle par ultrasons (ASTM E588)

Onde longitudinale (fréquence 5 MHz \pm 0,1 MHz, vitesse d'onde 6 km/s \pm 0,1 km/s), détection de fissures (<5 μ m \pm 1 μ m), erreur <5% \pm 1%.

Corrélation d'images numériques (DIC)

Erreur de déformation < 0,1 % \pm 0,02 %, caméra haute résolution (résolution < 5 μ m \pm 1 μ m), analyse de déformation de fracture, erreur < 5 % \pm 1 %.

3.1.3.2 Résistance à la compression

Définition : La résistance à la compression est la capacité du carbure cémenté à résister à la déformation ou aux dommages par compression, mesurée en MPa, et reflète la capacité portante du matériau sous des charges élevées.

Portée

La résistance à la compression du carbure cémenté est généralement de 4 000 à 6 000 mpa \pm 100 mpa, ce qui est bien supérieur à celui de l'acier à haute résistance (~ 2 000 mpa), de la céramique (~ 3 000 mpa) et de l'alliage de titane (~ 1 000 mpa), et convient aux conditions de charge élevée telles que le forage en haute mer et l'extrusion.

Les matériaux à l'échelle nanométrique peuvent atteindre 5 000 à 6 500 mpa \pm 100 mpa, ce qui est amélioré par le raffinement des grains.

Caractéristiques de performance

La résistance à la compression est dominée par la rigidité du wc (coefficient de Poisson 0,2 \pm 0,02,

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

module de Young $700 \text{ gpa} \pm 10 \text{ gpa}$), et la phase co soulage la concentration de contrainte (décroissance de contrainte $>20\% \pm 2\%$, contrainte de cisaillement $<100 \text{ mpa} \pm 10 \text{ mpa}$). Par exemple, la résistance à la compression du carbure cémenté contenant 10% de co est de $4500 \text{ mpa} \pm 100 \text{ mpa}$, et celle contenant 6% de co atteint $4700 \text{ mpa} \pm 100 \text{ mpa}$.

Application

Le foret en carbure contenant 6 % de Co a une déformation de $< 0,005 \text{ mm} \pm 0,001 \text{ mm}$ et une durée de vie de $> 300 \text{ heures} \pm 20 \text{ heures}$ dans le forage de roche dure (contrainte $> 3\ 000 \text{ MPa}$, dureté de la roche $> 1\ 000 \text{ MPa}$, vitesse de forage $> 10 \text{ m/h} \pm 1 \text{ m/h}$), ce qui est meilleur que celui des forets en acier (déformation $> 0,05 \text{ mm}$, durée de vie $< 100 \text{ heures}$).

La déformation du rouleau en carbure cémenté contenant du Cr (0,5%-1%) lors du concassage du minerai (charge $> 4000 \text{ MPa}$, granulométrie $< 10 \text{ mm} \pm 2 \text{ mm}$) est $< 0,003 \text{ mm} \pm 0,001 \text{ mm}$, et la durée de vie est augmentée de $35\% \pm 5\%$.

La filière d'extrusion contenant 8 % de Co a une déformation de $< 0,01 \text{ mm} \pm 0,002 \text{ mm}$ et une durée de vie de $> 5\ 000 \text{ heures} \pm 500 \text{ heures}$ dans le traitement des alliages d'aluminium ($600 \text{ }^\circ\text{C}$, charge $> 4\ 000 \text{ MPa}$, vitesse d'extrusion $> 5 \text{ m/min} \pm 0,5 \text{ m/min}$), ce qui est meilleur que celui de la filière en acier (durée de vie $< 1\ 000 \text{ heures}$).

Facteurs d'influence

Élément

Lorsque la teneur en Co augmente de 6% à 20%, la résistance diminue de $4700 \text{ à } 4100 \text{ MPa} \pm 100 \text{ MPa}$ car la phase Co réduit la rigidité (module de Young $200 \text{ GPa} \pm 10 \text{ GPa}$); Cr (0,5%-1%) augmente à $4800 \text{ MPa} \pm 100 \text{ MPa}$ car la solution solide CrCo est améliorée (force de liaison $>60 \text{ MPa} \pm 5 \text{ MPa}$); TiC (10%-15%) diminue à $4300 \text{ MPa} \pm 100 \text{ MPa}$ car la densité diminue ($<13 \text{ g/cm}^3 \pm 0,1 \text{ g/cm}^3$).

Technologie

La pression de frittage ($510 \text{ MPa} \pm 0,5 \text{ MPa}$) améliore la densité ($>99\% \pm 0,1\%$) et la résistance augmente de $3\% \pm 0,5\%$; le HIP ($100 \text{ MPa} \pm 5 \text{ MPa}$) élimine les pores (porosité $<0,1\% \pm 0,02\%$) et augmente la résistance de $5\% \pm 1\%$; une température excessivement élevée ($>1550^\circ\text{C}$) provoque la décomposition du WC (perte de carbone $<1\% \pm 0,2\%$) et diminue la résistance de $3\% \pm 0,5\%$.

Environnement

La température élevée (800°C) a diminué à $4000 \text{ MPa} \pm 100 \text{ MPa}$ (diminuée de $<10\%$) en raison d'une énergie de liaison réduite (longueur de liaison augmentée de $0,1 \text{ \AA} \pm 0,02 \text{ \AA}$); la chaleur humide (40°C , 90% d'humidité, 168 heures) a diminué de $3\% \pm 0,5\%$ en raison de la microcorrosion du Co (perte de poids $<0,1 \text{ mg/cm}^2 \pm 0,02 \text{ mg/cm}^2$); le froid extrême (-40°C) a augmenté de $2\% \pm 0,3\%$ en raison d'une rigidité accrue du WC; la haute pression ($>100 \text{ MPa}$, mer profonde) a augmenté de $3\% \pm 0,5\%$; le rayonnement (10^4 Gy) a diminué de $<1\% \pm 0,2\%$. Le Ni contenant ($12\% \text{ Ni}$, $4500 \text{ MPa} \pm 100 \text{ MPa}$) est plus stable en milieu marin (salinité 3,5%, pression 50 MPa), avec une diminution de $<1\%$.

Taux de chargement

Une vitesse élevée ($> 1 \text{ mm/min}$) induit des microfissures (longueur $< 5 \text{ }\mu\text{m} \pm 1 \text{ }\mu\text{m}$), avec une

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

réduction de $2\% \pm 0,3\%$; une vitesse faible ($< 0,5$ mm/min) maintient la résistance stable.

Méthodes de détection

Compression d'éprouvettes cylindriques (ASTM C773)

Le diamètre de l'échantillon est de $10 \text{ mm} \pm 0,1 \text{ mm}$, la hauteur est de $20 \text{ mm} \pm 0,1 \text{ mm}$, le taux de compression est de $0,5 \text{ mm/min} \pm 0,05 \text{ mm/min}$, l'erreur est $< 2\% \pm 0,5\%$, l'environnement est de $25 \text{ °C} \pm 2 \text{ °C}$ et la surface Ra est $< 0,2 \text{ } \mu\text{m} \pm 0,05 \text{ } \mu\text{m}$.

Essai de charge statique

Une presse hydraulique servo (précision de charge $\pm 1 \text{ kN}$, charge maximale $5000 \text{ kN} \pm 10 \text{ kN}$) est utilisée avec une erreur de $< 3\% \pm 0,5\%$, ce qui convient aux gros échantillons.

Contrôle non destructif (ultrasons, ASTM E494)

Détection de défauts d'ondes longitudinales (vitesse d'onde $6 \text{ km/s} \pm 0,1 \text{ km/s}$, fréquence $5 \text{ MHz} \pm 0,1 \text{ MHz}$), erreur $< 5\% \pm 1\%$, adaptée à la détection sur site.

Simulation par éléments finis

ANSYS (taille de maille $< 0,1 \text{ mm}$, erreur de contrainte $< 10 \text{ MPa}$) a été utilisé pour prédire la résistance avec une erreur de $< 5\% \pm 1\%$.

3.1.3.3 Résistance à la traction

Définition

La résistance à la traction est la capacité du carbure cémenté à résister à la rupture par traction et est mesurée en MPa, mais elle est généralement faible en raison de sa fragilité.

Portée

La résistance à la traction du carbure cémenté conventionnel est de 800 à $1\ 200 \text{ MPa}$, ce qui est limité par l'affaiblissement des limites des grains.

Les matériaux à l'échelle nanométrique peuvent atteindre $1\ 000$ à $1\ 400 \text{ MPa}$, et des traces de Ni améliorent la ténacité.

Facteurs d'influence

Une augmentation de la teneur en Co (par exemple, de 6% à 15%) améliore le produit d'environ 10 à 15% ; les défauts (par exemple, les pores) diminuent d'environ 5 à 10% .

application

Convient aux pièces avec de faibles charges de traction, telles que les matrices de tréfilage et les pièces de micro-tréfilage.

3.1.3.4 Résistance à la fatigue

Définition

La résistance à la fatigue est la capacité du carbure cémenté à résister à la fracture par fatigue sous une charge cyclique, mesurée en MPa.

Portée

La limite de fatigue du carbure cémenté conventionnel est de 800 à $1\ 200 \text{ MPa}$, 10^7 cycles.

Les matériaux à l'échelle nanométrique sont réduits à 600 - 900 MPa en raison de la concentration des contraintes aux limites des grains.

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

Facteurs d'influence

La rugosité de surface $Ra > 0,8 \mu\text{m}$ réduit la durée de vie en fatigue de 20 à 30 % ; un revêtement (tel que TiAlN) l'augmente d'environ 15 à 20 %.

Application

Convient aux outils à charge cyclique, tels que les fraises, avec une durée de vie de 1 000 à 1 500 heures.

3.1.3.5 Résumé des facteurs d'influence

Phase de liaison

À mesure que la teneur en Co augmente, la résistance augmente, mais une teneur en Co trop élevée (> 15 %) peut réduire la dureté.

Taille des grains

L'affinage de la taille des grains (par exemple $0,2 \mu\text{m}$) augmente la résistance à la compression mais réduit la résistance à la flexion et à la fatigue.

Défaut

La porosité, la phase amorphe ou les fissures réduisent tous les types de résistance de 5 à 15 %.

3.1.3.6 Suggestions d'environnement et d'optimisation

Impact environnemental

Une température élevée ($800 \text{ }^\circ\text{C}$) réduit la résistance de $10 \% \pm 1 \%$; une chaleur humide ($40 \text{ }^\circ\text{C}$, 90 % d'humidité) réduit la résistance de 3 à 5 % ; une pression élevée (> 100 MPa) augmente la résistance de 2 à 3 % ; un froid extrême ($-40 \text{ }^\circ\text{C}$) augmente la résistance de 2 à 3 % ; le rayonnement (10^4 Gy) affecte la résistance de < 1 %. Les carbures cémentés contenant du Ni ou du Cr sont plus stables dans des environnements difficiles (tels que l'océan, la chaleur humide).

Suggestions d'optimisation

Adoptez un procédé à faible teneur en Co (6%-8%), à haute densité ($> 99\% \pm 0,1\%$) et HIP, ajoutez du NbC ou du TaC pour améliorer la résistance et prolonger la durée de vie de 30% à 35%.

3.2 Propriétés thermiques du carbure cémenté

Les propriétés thermiques déterminent les performances du carbure cémenté lors de la coupe à haute température, des cycles thermiques et des environnements thermiques extrêmes. Il est largement utilisé dans les moteurs d'avion, les turbines à gaz et l'énergie nucléaire. Cette section analyse la conductivité thermique, le coefficient de dilatation thermique, la stabilité à haute température et la résistance aux chocs thermiques.

3.2.1 Conductivité thermique du carbure cémenté

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

Français La conductivité thermique du carbure cémenté est de $80120 \text{ W/m}\cdot\text{K} \pm 5 \text{ W/m}\cdot\text{K}$, ce qui est supérieur à celui de la céramique ($2030 \text{ W/m}\cdot\text{K}$), de l'alumine ($30 \text{ W/m}\cdot\text{K}$) et inférieur à celui du cuivre ($400 \text{ W/m}\cdot\text{K}$) et du graphite ($150 \text{ W/m}\cdot\text{K}$). Elle est déterminée par le WC ($110 \text{ W/m}\cdot\text{K} \pm 5 \text{ W/m}\cdot\text{K}$, dominé par la conductivité thermique électronique) et le Co ($70 \text{ W/m}\cdot\text{K} \pm 5 \text{ W/m}\cdot\text{K}$, diffusion des phonons $> 20 \% \pm 2 \%$). La conductivité thermique du carbure cémenté contenant 10 % de Co est de $100 \text{ W/m}\cdot\text{K} \pm 5 \text{ W/m}\cdot\text{K}$, et celle contenant 15 % de Co tombe à $90 \text{ W/m}\cdot\text{K} \pm 5 \text{ W/m}\cdot\text{K}$.

Une conductivité thermique élevée réduit la température de l'outil. Lors de l'usinage à grande vitesse d'alliages d'aluminium aéronautique (200 m/min, densité de flux thermique $> 10 \text{ MW/m}^2 \pm 1 \text{ MW/m}^2$), la température de surface des outils en carbure cémenté contenant 8 % de cobalt est $< 700 \text{ }^\circ\text{C} \pm 20 \text{ }^\circ\text{C}$, l'usure est $< 0,1 \text{ mm} \pm 0,02 \text{ mm}$ et la durée de vie est $> 12 \text{ heures} \pm 1 \text{ heure}$, ce qui est supérieur à celle des outils en céramique (température $> 900 \text{ }^\circ\text{C}$, durée de vie $< 4 \text{ heures}$). L'ajout de TiC (15 %, conductivité thermique $30 \text{ W/m}\cdot\text{K} \pm 5 \text{ W/m}\cdot\text{K}$) réduit cette valeur à $85 \text{ W/m}\cdot\text{K} \pm 5 \text{ W/m}\cdot\text{K}$, mais améliore la stabilité à haute température, ce qui convient aux buses aéronautiques ($1\ 100 \text{ }^\circ\text{C}$, débit de gaz $> 500 \text{ m/s} \pm 50 \text{ m/s}$). Par exemple, la buse contenant 15 % de TiC dans la turbine à gaz a une diffusivité thermique de $> 30 \text{ mm}^2 / \text{s} \pm 2 \text{ mm}^2 / \text{s}$, une déformation de $< 0,01 \text{ mm} \pm 0,002 \text{ mm}$ et une durée de vie de $> 6\ 000 \text{ heures} \pm 500 \text{ heures}$.

Français Les impacts environnementaux nécessitent une attention particulière. À haute température ($800 \text{ }^\circ\text{C}$), la conductivité thermique chute à $90 \text{ W/m}\cdot\text{K} \pm 5 \text{ W/m}\cdot\text{K}$ (une diminution de $< 10 \%$) en raison de la diffusion des électrons en phase Co (la mobilité diminue $< 10^{-4} \text{ cm}^2 / \text{V}\cdot\text{s} \pm 10^{-3} \text{ cm}^2 / \text{V}\cdot\text{s}$); à la chaleur humide ($40 \text{ }^\circ\text{C}$, 90 % d'humidité, 168 heures), la conductivité thermique chute à $< 2 \% \pm 0,5 \%$ en raison de l'oxydation de surface (couche d'oxydation $< 1 \text{ } \mu\text{m} \pm 0,2 \text{ } \mu\text{m}$); à un froid extrême ($40 \text{ }^\circ\text{C}$), la conductivité thermique augmente de $1 \% \pm 0,3 \%$ en raison de la conductivité thermique améliorée des phonons; à haute pression ($> 100 \text{ MPa}$), la conductivité thermique augmente de $2 \% \pm 0,3 \%$; au rayonnement (10^4 Gy), la conductivité thermique chute de $< 1 \% \pm 0,2 \%$. Le carbure cémenté contenant du Ni (12 % Ni, $95 \text{ W/m}\cdot\text{K} \pm 5 \text{ W/m}\cdot\text{K}$) est plus stable dans les environnements marins (salinité 3,5 %, pression 50 MPa), avec une diminution de $< 1 \%$.

Par exemple, la conductivité thermique du moule contenant du Ni a été maintenue à $93 \text{ W/m}\cdot\text{K} \pm 5 \text{ W/m}\cdot\text{K}$ et la déformation était $< 0,01 \text{ mm} \pm 0,002 \text{ mm}$ pendant l'emboutissage à chaud humide ($40 \text{ }^\circ\text{C}$, 90 % d'humidité, $600 \text{ }^\circ\text{C}$), ce qui était meilleur que celui du matériau contenant du Co (diminution $> 3 \% \pm 0,5 \%$).

L'optimisation de la conductivité thermique nécessite un équilibre entre les performances à haute température. En coupe par cycle thermique ($25\ 800 \text{ }^\circ\text{C}$, 1 000 fois, différence de température $> 500 \text{ }^\circ\text{C} \pm 10 \text{ }^\circ\text{C}$), la longueur de fissure des outils en carbure cémenté contenant 10 % de cobalt est inférieure à $5 \text{ } \mu\text{m} \pm 1 \text{ } \mu\text{m}$, ce qui est supérieur à celle des outils en céramique (fissure $> 20 \text{ } \mu\text{m}$). Une comparaison inter-domaines montre que la conductivité thermique du carbure cémenté est supérieure à celle des céramiques et des alliages de titane ($20 \text{ W/m}\cdot\text{K}$), mais inférieure à celle du cuivre et du graphite.

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

3.2.1.1 Méthode d'essai de conductivité thermique

Les méthodes de test de conductivité thermique comprennent :

Méthode du flash laser (ASTM E1461)

Carbure cémenté contenant 10 % de cobalt ($100 \text{ W/m}\cdot\text{K} \pm 5 \text{ W/m}\cdot\text{K}$), diamètre de l'échantillon : $12,7 \text{ mm} \pm 0,1 \text{ mm}$, épaisseur : $2 \text{ mm} \pm 0,1 \text{ mm}$, largeur d'impulsion laser : $0,5 \text{ ms} \pm 0,05 \text{ ms}$, erreur de diffusivité thermique : $< 1 \% \pm 0,2 \%$ et erreur totale : $< 2 \% \pm 0,5 \%$. L'environnement nécessite une température de $25 \text{ }^\circ\text{C} \pm 2 \text{ }^\circ\text{C}$.

Méthode du flux de chaleur à l'état stationnaire (ASTM C177)

Le carbure cémenté contenant 8 % de Co ($98 \text{ W/m}\cdot\text{K} \pm 5 \text{ W/m}\cdot\text{K}$) utilise un échantillon de $50 \times 50 \times 10 \text{ mm} \pm 0,1 \text{ mm}$, une différence de température de $10 \text{ }^\circ\text{C} \pm 0,5 \text{ }^\circ\text{C}$, une précision de flux thermique de $\pm 0,1 \text{ W/m}^2$ et une erreur de $< 3 \% \pm 0,5 \%$.

Méthode du fil chaud transitoire (ASTM D5930) : le carbure cémenté contenant du TiC ($85 \text{ W/m}\cdot\text{K} \pm 5 \text{ W/m}\cdot\text{K}$) utilise une puissance de fil chaud de $0,1 \text{ W} \pm 0,01 \text{ W}$, une résolution de température de $0,1 \text{ }^\circ\text{C} \pm 0,05 \text{ }^\circ\text{C}$, une erreur de $< 5 \% \pm 1 \%$, et convient aux matériaux non uniformes.

Simulation de mesure de température infrarouge

La distribution du flux thermique du carbure cémenté contenant 10 % de Co (erreur de conductivité thermique $< 5 \% \pm 1 \%$) a été analysée à l'aide d'une caméra infrarouge (résolution $< 0,1 \text{ }^\circ\text{C} \pm 0,05 \text{ }^\circ\text{C}$) (erreur $< 5 \% \pm 1 \%$).

Par exemple, un outil contenant 10 % de Co est testé par la méthode du flash laser ($100 \text{ W/m}\cdot\text{K} \pm 5 \text{ W/m}\cdot\text{K}$), et la température de surface de vérification infrarouge est $< 700 \text{ }^\circ\text{C} \pm 20 \text{ }^\circ\text{C}$, garantissant une durée de vie de coupe de $> 12 \text{ heures} \pm 1 \text{ heure}$.

3.2.1.2 Facteurs affectant la conductivité thermique

La conductivité thermique est affectée par :

Français : Composition : Lorsque la teneur en Co augmente de 10 % à 15 %, la conductivité thermique diminue de $100 \text{ à } 90 \text{ W/m}\cdot\text{K} \pm 5 \text{ W/m}\cdot\text{K}$ en raison de la diffusion accrue des phonons du Co (taux de diffusion $> 20 \% \pm 2 \%$). TiC (15 %) diminue à $85 \text{ W/m}\cdot\text{K} \pm 5 \text{ W/m}\cdot\text{K}$ en raison d'une faible conductivité thermique ($30 \text{ W/m}\cdot\text{K}$). Ni (12 %) augmente à $95 \text{ W/m}\cdot\text{K} \pm 5 \text{ W/m}\cdot\text{K}$ en raison d'une conductivité thermique électronique plus élevée (mobilité $> 1,5 \times 10^4 \text{ cm}^2/\text{V}\cdot\text{s} \pm 10^3 \text{ cm}^2/\text{V}\cdot\text{s}$).

Procédé : Une température de frittage ($1450 \text{ }^\circ\text{C} \pm 10 \text{ }^\circ\text{C}$) améliore la continuité de phase WC (surface de contact $> 90 \% \pm 2 \%$), et la conductivité thermique augmente de $3 \% \pm 0,5 \%$; le HIP ($100 \text{ MPa} \pm 5 \text{ MPa}$) réduit la porosité ($< 0,1 \% \pm 0,02 \%$), et l'augmente de $2 \% \pm 0,3 \%$. Une température trop élevée ($> 1550 \text{ }^\circ\text{C}$) provoque une ségrégation du Co (taux de ségrégation $< 5 \% \pm 1 \%$), et diminue de

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

3%±0,5%.

Environnement : La température élevée (800 °C) diminue de 10 % ± 1 % en raison de la diffusion des électrons ; la chaleur humide (40 °C, 90 % d'humidité) diminue de < 2 % ± 0,5 % en raison de la couche d'oxyde (< 1 µm ± 0,2 µm) ; le froid extrême (40 °C) augmente de 1 % ± 0,3 % en raison de la conduction thermique des phonons ; la haute pression (> 100 MPa) augmente de 2 % ± 0,3 % ; le rayonnement (10⁴ Gy) diminue de < 1 % ± 0,2 %.

Taille de l'échantillon : L'épaisseur (> 2 mm ± 0,1 mm) réduit la diffusion des limites (< 10 % ± 2 %) et augmente la conductivité thermique de 2 % ± 0,3 % ; la rugosité de surface (Ra > 0,4 µm) provoque une perte de dissipation thermique, qui diminue de 1 % ± 0,2 %.

Par exemple, un outil contenant 8 % de Co et un procédé HIP (100 W/m·K±5 W/m·K) maintient une conductivité thermique de 95 W/m·K±5 W/m·K en coupe à haute température (800 °C) et une durée de vie de > 12 heures ± 1 heure. L'optimisation nécessite une faible teneur en TiC et un HIP.

3.2.2 Coefficient de dilatation thermique

Le coefficient de dilatation thermique (CTE) du carbure cémenté est de $46 \times 10^{-6} /K \pm 0,1 \times 10^{-6} /K$, ce qui est inférieur à celui de la céramique ($810 \times 10^{-6} /K$), de l'acier à haute résistance ($12 \times 10^{-6} /K$) et de l'alliage de titane ($9 \times 10^{-6} /K$), et est déterminé par la moyenne pondérée du WC ($4,5 \times 10^{-6} /K \pm 0,1 \times 10^{-6} /K$) et du Co ($12 \times 10^{-6} /K \pm 0,1 \times 10^{-6} /K$). Le CTE du carbure cémenté contenant 10 % de Co est de $5,5 \times 10^{-6} /K \pm 0,1 \times 10^{-6} /K$, et celui contenant 15 % de Co augmente à $5,8 \times 10^{-6} /K \pm 0,1 \times 10^{-6} /K$.

Un faible CTE réduit les contraintes thermiques (< 200 MPa ± 20 MPa). Lors de l'emboutissage à haute température (600 °C, charge > 2 000 MPa, différence de température > 400 °C ± 10 °C), la déformation des moules en carbure cémenté contenant 8 % de Co est < 0,005 mm ± 0,001 mm et la précision est multipliée par 5, ce qui est supérieur à celle des moules en acier (déformation > 0,05 mm, erreur de précision > 0,1 mm). L'ajout de TiC (15 %, CTE $7 \times 10^{-6} /K \pm 0,1 \times 10^{-6} /K$) est réduit à $5,0 \times 10^{-6} /K \pm 0,1 \times 10^{-6} /K$, et la longueur de la fissure thermique est < 1 µm ± 0,2 µm.

Par exemple, la tolérance de déformation des buses contenant du TiC dans le formage de composites aéronautiques (800 °C, pression > 100 MPa) est < 0,01 mm ± 0,002 mm et la durée de vie est > 5 000 heures ± 500 heures, ce qui est mieux que les buses en céramique (fissures > 10 µm).

Français L'impact environnemental est limité. Une température élevée (1 000 °C) augmente le CTE de $0,2 \times 10^{-6} /K \pm 0,05 \times 10^{-6} /K$ en raison de la dilatation du réseau (la constante du réseau augmente de 0,1 % ± 0,02 %) ; la chaleur humide (40 °C, 90 % d'humidité, 168 heures) ne présente aucun changement évident (erreur < $0,05 \times 10^{-6} /K$) ; une pression élevée (> 100 MPa) diminue de $0,1 \times 10^{-6} /K \pm 0,02 \times 10^{-6} /K$; un froid extrême (40 °C) diminue de $0,1 \times 10^{-6} /K \pm 0,02 \times 10^{-6} /K$; Le rayonnement (10⁴ Gy) augmente de $< 0,05 \times 10^{-6} /K \pm 0,01 \times 10^{-6} /K$. Le carbure cémenté

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

contenant du Ni (12 % Ni, $5,2 \times 10^{-6} /K \pm 0,1 \times 10^{-6} /K$) est plus stable dans l'environnement marin (salinité 3,5 %, pression 50 MPa).

Par exemple, un pipeline contenant du Ni a fonctionné dans du pétrole et du gaz en haute mer (pH 8, 5 000 m de profondeur) pendant 3 ans, avec un CTE de $5,3 \times 10^{-6} /K \pm 0,1 \times 10^{-6} /K$ et une déformation de $< 0,01 \text{ mm} \pm 0,002 \text{ mm}$.

L'optimisation du CTE nécessite un faible ajout de Co (6 % 8 %) et de TiC. La longueur de fissure de l'outil contenant 10 % de Co lors des cycles thermiques (25 800 °C, 1 000 fois, différence de température $> 500 \text{ °C} \pm 10 \text{ °C}$) est inférieure à $5 \text{ }\mu\text{m} \pm 1 \text{ }\mu\text{m}$, ce qui est supérieur à celui de la céramique (fissure $> 20 \text{ }\mu\text{m}$). Une comparaison inter-champs montre que le CTE du carbure cémenté est supérieur à celui de l'acier et de l'alliage de titane, mais inférieur à celui de l'alliage Invar en termes de dilatation ultra-faible ($< 2 \times 10^{-6} /K$).

3.2.2.1 Méthode d'essai du coefficient de dilatation thermique

Les méthodes de test CTE comprennent :

Calorimétrie différentielle à balayage (DSC, ASTM E228) : carbure cémenté contenant 10 % de cobalt ($5,5 \times 10^{-6} /K \pm 0,1 \times 10^{-6} /K$) avec un échantillon de $10 \times 5 \times 5 \text{ mm} \pm 0,1 \text{ mm}$, une vitesse de chauffe de $5 \text{ °C/min} \pm 0,5 \text{ °C/min}$, une précision de déplacement de $0,1 \text{ }\mu\text{m} \pm 0,05 \text{ }\mu\text{m}$ et une erreur $< 2 \% \pm 0,5 \%$. La température ambiante est de $25 \text{ °C} \pm 2 \text{ °C}$.

Analyse thermomécanique (TMA, ASTM E831) : carbure cémenté contenant 8 % de Co ($5,4 \times 10^{-6} /K \pm 0,1 \times 10^{-6} /K$) en utilisant un échantillon de $5 \times 5 \times 10 \text{ mm} \pm 0,1 \text{ mm}$, charge $0,1 \text{ N} \pm 0,01 \text{ N}$, résolution de température $0,1 \text{ °C} \pm 0,05 \text{ °C}$, erreur $< 3 \% \pm 0,5 \%$.

Interférométrie optique : Le carbure cémenté contenant du TiC ($5,0 \times 10^{-6} /K \pm 0,1 \times 10^{-6} /K$) utilise un interféromètre laser (longueur d'onde $632,8 \text{ nm} \pm 0,1 \text{ nm}$, résolution $0,01 \text{ }\mu\text{m} \pm 0,005 \text{ }\mu\text{m}$), avec une erreur de $< 5 \% \pm 1 \%$, ce qui convient à une haute précision.

Diffraction des rayons X (DRX) : le rayonnement CuK α (longueur d'onde $1,5406 \text{ \AA} \pm 0,0001 \text{ \AA}$) a été utilisé pour analyser le CTE à haute température (erreur $< 5 \% \pm 1 \%$) du carbure cémenté contenant 10 % de Co (erreur d'expansion du réseau $< 0,1 \% \pm 0,02 \%$).

Par exemple, les buses contenant du TiC passent les tests DSC et TMA ($5,0 \times 10^{-6} /K \pm 0,1 \times 10^{-6} /K$), garantissant une durée de vie de formage de $> 5000 \text{ heures} \pm 500 \text{ heures}$.

3.2.2.2 Facteurs affectant le coefficient de dilatation thermique

L'ETC est affectée par les facteurs suivants :

Français : Composition : La teneur en Co augmente de 10 % à 15 %, et le CTE augmente de $5,5$ à $5,8 \times 10^{-6} /K \pm 0,1 \times 10^{-6} /K$ en raison du CTE élevé de la phase Co ($12 \times 10^{-6} /K$). TiC (15 %) diminue à $5,0 \times 10^{-6} /K \pm 0,1 \times 10^{-6} /K$ en raison du faible CTE ($7 \times 10^{-6} /K$). Ni (12 %) diminue à $5,2 \times 10^{-6} /K$.

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

$/K \pm 0,1 \times 10^{-6} /K$ en raison du CTE plus faible de Ni ($13 \times 10^{-6} /K$).

Procédé : La température de frittage ($1450^{\circ}C \pm 10^{\circ}C$) assure l'uniformité du WCCo (erreur de distribution $< 5\% \pm 1\%$) et la stabilité du CTE ; une température trop élevée ($> 1550^{\circ}C$) induit une ségrégation du Co, augmentant $0,2 \times 10^{-6} /K \pm 0,05 \times 10^{-6} /K$. Le HIP ($100 \text{ MPa} \pm 5 \text{ MPa}$) réduit la contrainte ($< 50 \text{ MPa} \pm 10 \text{ MPa}$) et diminue $0,1 \times 10^{-6} /K \pm 0,02 \times 10^{-6} /K$.

Environnement : La température élevée ($1\ 000^{\circ}C$) augmente de $0,2 \times 10^{-6} /K \pm 0,05 \times 10^{-6} /K$ en raison de la dilatation du réseau ; la chaleur humide ($40^{\circ}C$, 90 % d'humidité) ne change pas ; la haute pression ($> 100 \text{ MPa}$) diminue de $0,1 \times 10^{-6} /K \pm 0,02 \times 10^{-6} /K$; le froid extrême ($40^{\circ}C$) diminue de $0,1 \times 10^{-6} /K \pm 0,02 \times 10^{-6} /K$; le rayonnement (10^4 Gy) augmente de $< 0,05 \times 10^{-6} /K \pm 0,01 \times 10^{-6} /K$.

Taille de l'échantillon : la longueur ($> 10 \text{ mm} \pm 0,1 \text{ mm}$) réduit l'erreur de mesure ($< 0,05 \times 10^{-6} /K$) ; la rugosité de surface ($R_a > 0,4 \mu\text{m}$) induit une contrainte, augmentant de $0,1 \times 10^{-6} /K \pm 0,02 \times 10^{-6} /K$.

un moule contenant 8 % de Co et TiC ($5,0 \times 10^{-6} /K \pm 0,1 \times 10^{-6} /K$, procédé HIP) maintient un CTE de $4,9 \times 10^{-6} /K \pm 0,1 \times 10^{-6} /K$ et une déformation $< 0,005 \text{ mm} \pm 0,001 \text{ mm}$ pendant l'emboutissage à haute température ($600^{\circ}C$). TiC et HIP sont nécessaires pour l'optimisation.

3.2.3 Stabilité à haute température

La dureté du carbure cémenté à $1\ 000^{\circ}C$ diminue de $< 30\%$ (HV $1\ 800 \pm 30$ à $1\ 200 \pm 30$), ce qui est supérieur à celui de l'acier rapide ($600^{\circ}C$, HV 500), de la céramique ($1\ 200^{\circ}C$, HV 800) et des alliages de titane ($600^{\circ}C$, HV 200). La stabilité est déterminée par le point de fusion élevé du WC ($2\ 870^{\circ}C \pm 20^{\circ}C$, énergie de décomposition $> 500 \text{ kJ/mol} \pm 10 \text{ kJ/mol}$) et la thermoplasticité de la phase Co (température de Curie $1\ 120^{\circ}C \pm 10^{\circ}C$, déformation plastique $< 5\% \pm 0,5\%$). La dureté du carbure cémenté contenant 10 % de Co à $1000^{\circ}C$ est HV 1300 ± 30 et la perte par usure est $< 0,2 \text{ mm} \pm 0,05 \text{ mm}$.

La stabilité à haute température permet des conditions de travail extrêmes. L'usure de l'outil contenant 8 % de cobalt dans un alliage de titane aéronautique à $1\ 000^{\circ}C$ (vitesse de 150 m/min , densité de flux thermique $> 10 \text{ MW/m}^2 \pm 1 \text{ MW/m}^2$) est inférieure à $0,15 \text{ mm} \pm 0,03 \text{ mm}$, et sa durée de vie est supérieure à 10 heures ± 1 heure, ce qui est supérieur à celle des outils en céramique (usure $> 0,5 \text{ mm}$). L'ajout de TaC ($1\% \pm 2\%$) améliore la rigidité à haute température (réduction du module de Young $< 5\% \pm 1\%$) grâce au renforcement de la solution solide (déformation du réseau $< 2\% \pm 0,2\%$), et la dureté est maintenue à HV $1\ 400 \pm 30$. Par exemple, la buse contenant du TaC fonctionne dans une turbine à gaz ($1100^{\circ}C$, débit de gaz $> 500 \text{ m/s} \pm 50 \text{ m/s}$), avec des dommages de surface $< 10 \mu\text{m} \pm 2 \mu\text{m}$ et une durée de vie $> 6000 \text{ heures} \pm 500 \text{ heures}$, ce qui est mieux que les matériaux sans TaC (dommages $> 20 \mu\text{m}$).

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

Français Les impacts environnementaux nécessitent une attention particulière. L'oxydation à haute température (600 °C) génère du CoO et du WO₃ (perte de poids 0,5 mg/cm² ± 0,1 mg/cm², couche d'oxyde < 2 µm ± 0,5 µm), et la dureté diminue de 5 % 10 % ± 1 % ; la chaleur humide (40 °C, 90 % d'humidité, 168 heures) affecte < 2 % ± 0,5 % ; la haute pression (> 100 MPa) améliore la stabilité, réduisant < 3 % ± 0,5 % ; le froid extrême (40 °C) n'a aucun changement ; le rayonnement (10⁴ Gy) réduit < 1 % ± 0,2 %. Le carbure cémenté contenant du Cr (0,5 % 1 %) forme une couche protectrice de Cr₂O₃ (épaisseur < 5 nm ± 1 nm, coefficient de diffusion < 10⁻¹⁴ cm² / s), et sa dureté à 1 000 °C est maintenue à HV 1 350 ± 30. Par exemple, la déformation d'une filière contenant du Cr lors d'une extrusion à haute température (800 °C, charge > 2 000 MPa) est < 0,01 mm ± 0,002 mm, et sa durée de vie est augmentée de 30 % ± 5 %.

Français L'optimisation nécessite du TaC et un revêtement. Les revêtements CVD (par exemple Al₂O₃, épaisseur 5 µm ± 1 µm, conductivité thermique 10 W/m·K ± 2 W/m·K) réduisent la chute de dureté de 50 %. Les outils avec revêtements Al₂O₃ ont une durée de vie > 12 heures ± 1 heure dans l'usinage de moteurs aérospatiaux (1000 °C, fréquence de vibration > 10³ Hz ± 100 Hz), ce qui est mieux que les outils non revêtus (durée de vie < 4 heures). Les comparaisons inter-domaines montrent que le carbure cémenté a une meilleure stabilité à haute température que l'acier et les alliages de titane, mais est inférieur à la céramique (Si₃N₄, dureté > 1000 HV) à des températures ultra-élevées (> 1500 °C).

3.2.3.1 Méthode d'essai de stabilité à haute température

Les méthodes de test de stabilité à haute température comprennent :

Essai de dureté à haute température (ASTM E18) : carbure cémenté contenant 10 % de Co (HV 1300±30, 1000 °C) avec pénétrateur Vickers, charge 10 kg±0,1 kg, maintien 5 s±0,5 s, erreur < 2 %±0,5 %. Exigences environnementales 1000 °C±10 °C, atmosphère N₂ (pureté > 99,99 %±0,01 %).

Analyse thermogravimétrique (TGA, ASTM E1131) : Carbure cémenté contenant 8 % de Co (gain de poids par oxydation < 2 mg/cm² ± 0,2 mg/cm², 1000 °C) à partir d'un échantillon de 10 × 10 × 2 mm ± 0,1 mm, chauffage 10 °C/min ± 0,5 °C/min, résolution de masse 0,1 µg ± 0,05 µg, erreur < 3 % ± 0,5 %.

Essai d'usure à haute température (ASTM G65) : carbure cémenté contenant du TaC (usure < 0,2 mm ± 0,05 mm, 1 000 °C) avec frottement de la meule (vitesse 1 m/s ± 0,1 m/s, charge 50 N ± 1 N), erreur < 5 % ± 1 %.

Essai de traction à haute température : le carbure cémenté contenant du Cr (limite d'élasticité > 1000 MPa ± 50 MPa, 800 °C) utilise un diamètre d'échantillon de 5 mm ± 0,1 mm, une vitesse de 0,1 mm/min ± 0,01 mm/min et une erreur de < 5 % ± 1 %.

Par exemple, les buses contenant du TaC passent les tests de dureté à haute température et TGA (HV 1400±30, gain de poids < 1 mg/cm² ± 0,1 mg/cm²), garantissant une durée de vie de > 6000 heures

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

±500 heures.

3.2.3.2 Facteurs affectant la stabilité à haute température

La stabilité à haute température est affectée par les facteurs suivants :

Composition : La teneur en Co augmente de 6 % à 15 %, et la dureté diminue de 25 % à 35 % ± 2 % (1 000 °C, HV 1 500 à 1 000 ± 30) en raison du ramollissement du Co (limite d'élasticité < 400 MPa ± 20 MPa). Le TaC (1 % à 2 %) diminue de < 20 % ± 2 % en raison du renforcement de la solution solide. Le Cr (0,5 % à 1 %) diminue de < 15 % ± 2 % en raison de la couche protectrice de Cr₂O₃.

Procédé : La température de frittage (1450°C±10°C) assure la stabilité du WC (taux de décomposition < 0,1%±0,02%), stabilité augmentée de 5%±1% ; le HIP (100 MPa±5 MPa) élimine les défauts, augmenté de 3%±0,5%. Une température trop élevée (>1550°C) induit une oxydation (gain de poids > 2 mg/cm² ± 0,2 mg/cm²), diminuée de 5%±1%.

Environnement : L'oxydation à haute température (600°C) diminue de 5% à 10% ± 1% en raison de la formation de CoO ; la chaleur humide (40°C, 90% d'humidité) affecte < 2% ± 0,5% ; la haute pression (>100 MPa) augmente de 3% ± 0,5% ; le rayonnement (10⁴Gy) diminue de < 1% ± 0,2%.

Revêtement : Le revêtement Al₂O₃ (5 µm ± 1 µm) réduit l'oxydation (gain de poids < 0,5 mg/cm² ± 0,1 mg/cm²) et augmente la stabilité de 50 % ± 5 % ; le revêtement TiN (5 µm ± 1 µm) augmente de 30 % ± 3 %.

avec revêtement Cr et Al₂O₃ (HV 1350±30, 1000°C) a une déformation de < 0,01mm ± 0,002mm et une durée de vie de > 6000h ± 500h lors d'une extrusion à haute température (800°C). TaC et revêtement sont nécessaires pour l'optimisation.

3.2.4 Résistance aux chocs thermiques

La résistance aux chocs thermiques du carbure cémenté est évaluée par un essai de choc thermique (refroidissement par eau à 500 °C, 100 fois, ASTM C1525). La longueur des fissures est inférieure à 5 µm ± 1 µm, ce qui est supérieur à celle de la céramique (> 10 µm) et de l'alumine (> 15 µm). La résistance aux chocs thermiques est déterminée par un faible coefficient de dilatation thermique (CTE) ($5,5 \times 10^{-6} /K \pm 0,1 \times 10^{-6} /K$), une conductivité thermique élevée (100 W/m·K ± 5 W/m·K) et une résistance élevée (> 4 000 MPa ± 100 MPa). La contrainte thermique est inférieure à 200 MPa ± 20 MPa. La profondeur de fissure du carbure cémenté contenant 12 % de Co dans le cycle thermique (25 800 °C, 1 000 fois, différence de température > 500 °C ± 10 °C) est < 3 µm ± 0,5 µm.

La résistance aux chocs thermiques est compatible avec les conditions de cyclage thermique. Le moule contenant 10 % de cobalt présente un taux de fissuration inférieur à 0,5 % et une durée de vie supérieure à 5 000 heures ± 500 heures en emboutissage haute température (600 °C, fréquence > 10⁴ fois/heure, différence de température > 400 °C ± 10 °C), ce qui est supérieur à celui des moules

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

en acier (taux de fissuration > 5 %). L'ajout de chrome (0,5 % à 1 %) pour former une couche protectrice de chrome Cr₂O₃ (épaisseur < 5 nm ± 1 nm) améliore la résistance aux chocs thermiques de 15 % ± 2 % et réduit le taux d'amorçage des fissures de 20 % ± 3 %. Par exemple, les dommages de surface de la buse contenant du Cr sont < 5 μm ± 1 μm dans le cycle thermique de la turbine à gaz (1100 °C, débit de gaz > 500 m/s ± 50 m/s), et la durée de vie est prolongée de 35% ± 5%.

Français Les influences environnementales comprennent l'oxydation à haute température (600 °C, formation de CoO, épaisseur < 2 μm ± 0,5 μm, résistance aux chocs thermiques diminuée de 5 % ± 1 %), la chaleur humide (40 °C, 90 % d'humidité, diminuée de < 2 % ± 0,5 %), la haute pression (> 100 MPa, augmentée de 3 % ± 0,5 %), le froid extrême (40 °C, taux de fissure augmenté de 3 % ± 0,5 %), et le rayonnement (10⁴ Gy, diminué de < 1 % ± 0,2 %). Le carbure cémenté contenant du Ni (12 % Ni, fissure < 3 μm ± 0,5 μm) est plus stable dans la vapeur d'eau des centrales nucléaires (500 °C, 10 MPa, débit de vapeur > 100 m/s ± 10 m/s). Par exemple, un pipeline contenant du Ni est en service depuis 3 ans avec des fissures < 3 μm ± 0,5 μm, ce qui est mieux que les matériaux contenant du Co (fissures > 5 μm).

Français L'optimisation nécessite une teneur élevée en Co (10 % 12 %) et un revêtement. Les revêtements CVD (tels que TiN, 5 μm ± 1 μm, conductivité thermique 20 W/m·K ± 2 W/m·K) réduisent le taux de fissures de 50 % ± 5 %. La durée de vie des outils revêtus de TiN en coupe par cycle thermique (800 °C, fréquence de vibration > 10³ Hz ± 100 Hz) est > 10 heures ± 1 heure, ce qui est mieux que les outils non revêtus (durée de vie < 4 heures). Les comparaisons inter-domaines montrent que le carbure cémenté a une meilleure résistance aux chocs thermiques que les céramiques et les alliages de titane, mais est inférieur aux composites en fibres de carbone (fissures < 1 μm) sous choc thermique ultra élevé.

3.2.4.1 Méthode d'essai de résistance aux chocs thermiques

Les méthodes de test de résistance aux chocs thermiques comprennent :

Essai de choc thermique (ASTM C1525) : Carbure cémenté contenant 12 % de Co (fissure < 5 μm ± 1 μm) en utilisant un échantillon 10 × 10 × 5 mm ± 0,1 mm, refroidissement par eau à 500 °C (différence de température > 450 °C ± 10 °C), 100 fois, détection de fissures par MEB (résolution < 5 nm ± 1 nm), erreur < 3 % ± 0,5 %.

Essai de fatigue par cycle thermique : du carbure cémenté contenant 10 % de Co (fissure < 3 μm ± 0,5 μm) a été soumis à un cycle à 25 800 °C 1 000 fois, avec une différence de température de > 500 °C ± 10 °C et une erreur de < 5 % ± 1 %.

Contrôle par ultrasons (ASTM E588) : Pour le carbure cémenté contenant du Cr (profondeur de fissure < 5 μm ± 1 μm), une onde longitudinale (fréquence 5 MHz ± 0,1 MHz, vitesse de l'onde 6 km/s ± 0,1 km/s) est utilisée, avec une erreur de < 5 % ± 1 %.

Imagerie thermique infrarouge : le carbure cémenté contenant du Ni (fissure < 3 μm ± 0,5 μm)

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

utilise une caméra infrarouge (résolution $0,1 \text{ } ^\circ\text{C} \pm 0,05 \text{ } ^\circ\text{C}$) pour analyser la distribution des contraintes thermiques (erreur $< 5 \% \pm 1 \%$).

Par exemple, les buses contenant du Cr passent les tests de choc thermique et d'ultrasons (fissure $< 5 \text{ } \mu\text{m} \pm 1 \text{ } \mu\text{m}$), garantissant une durée de vie de la turbine à gaz de $> 5\,000 \text{ heures} \pm 500 \text{ heures}$.

3.2.4.2 Facteurs affectant la résistance aux chocs thermiques

La résistance aux chocs thermiques est affectée par les facteurs suivants :

Composition : La teneur en Co augmente de $10 \% \text{ à } 12 \%$, la résistance aux chocs thermiques augmente de $15 \% \pm 2 \%$ en raison d'une plasticité améliorée (déformation $< 5 \% \pm 0,5 \%$). Le TiC (15%) diminue de $10 \% \pm 1 \%$ en raison d'un CTE réduit ($5,0 \times 10^{-6} / \text{K} \pm 0,1 \times 10^{-6} / \text{K}$) mais d'une conductivité thermique réduite ($85 \text{ W/m}\cdot\text{K} \pm 5 \text{ W/m}\cdot\text{K}$). Le Cr ($0,5 \% \text{ à } 1 \%$) augmente de $15 \% \pm 2 \%$ en raison de la couche protectrice de Cr_2O_3 .

Procédé : La température de frittage ($1450^\circ\text{C} \pm 10^\circ\text{C}$) améliore l'uniformité et la résistance aux chocs thermiques de $5\% \pm 1\%$; le HIP ($100 \text{ MPa} \pm 5 \text{ MPa}$) réduit les défauts de $10\% \pm 1\%$. Un refroidissement rapide ($> 10^\circ\text{C}/\text{min}$) induit une contrainte ($> 100 \text{ MPa} \pm 10 \text{ MPa}$), qui diminue de $5\% \pm 1\%$.

Environnement : L'oxydation à haute température (600°C) diminue de $5\% \pm 1\%$ en raison de la formation de CoO ; la chaleur humide (40°C , 90% d'humidité) diminue de $< 2\% \pm 0,5\%$; la haute pression ($> 100 \text{ MPa}$) augmente de $3\% \pm 0,5\%$; le froid extrême (40°C) diminue de $3\% \pm 0,5\%$; le rayonnement (10^4 Gy) diminue de $< 1\% \pm 0,2\%$.

Revêtement : Le revêtement TiN ($5 \text{ } \mu\text{m} \pm 1 \text{ } \mu\text{m}$) réduit la contrainte thermique ($< 150 \text{ MPa} \pm 20 \text{ MPa}$), augmentée de $50 \% \pm 5 \%$; le revêtement Al_2O_3 augmente de $30 \% \pm 3 \%$.

Par exemple, un outil avec un revêtement à 10% de Co et TiN (fissure $< 3 \text{ } \mu\text{m} \pm 0,5 \text{ } \mu\text{m}$) a une durée de vie $> 10 \text{ heures} \pm 1 \text{ heure}$ en coupe à cycle thermique ($800 \text{ } ^\circ\text{C}$). L'optimisation nécessite des revêtements à haute teneur en Co et TiN.

3.3 Stabilité chimique du carbure cémenté

Français La stabilité chimique du carbure cémenté fait référence à sa capacité à résister aux réactions chimiques ou à la corrosion dans divers environnements (tels que l'acide, l'alcali, la température élevée, la chaleur humide, etc.), qui est principalement déterminée par les propriétés chimiques de la phase dure du carbure de tungstène (WC) et de la phase de liaison au cobalt (Co) ou au nickel (Ni). Le WC a une excellente résistance à l'oxydation et à la corrosion, et est chimiquement inerte, mais il peut se décomposer ou s'oxyder pour former WO_3 à des températures élevées ($> 800 \text{ } ^\circ\text{C}$). La phase Co est relativement active et est sujette à la corrosion dans les environnements acides ($\text{pH} < 4$, tels que HCl , H_2SO_4) ou humides et chauds ($40 \text{ } ^\circ\text{C}$, 90% d'humidité), avec un taux de perte de poids de $0,1 \text{ à } 0,2 \text{ mg/cm}^2 / \text{an}$, tandis que la phase Ni est plus résistante à la corrosion (perte de poids $< 0,05 \text{ mg/cm}^2 / \text{an}$).

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

La stabilité chimique du carbure cémenté est affectée par sa composition et son procédé : la réduction de la teneur en Co (6 %-8 %) ou l'ajout de Cr et de TiC (0,5 %-1 %) peut former une couche protectrice (comme Cr_2O_3), ce qui améliore la résistance à la corrosion d'environ 10 %-15 % ; le frittage à haute température (1 350-1 450 °C) et le procédé HIP réduisent la porosité (< 0,05 %), réduisent les canaux de corrosion et améliorent la stabilité d'environ 5 %-10 %. Dans les applications pratiques, le carbure cémenté contenant du Ni présente une excellente stabilité en milieu marin (salinité 3,5 %, 50 MPa), avec une chute de résistance < 1 % et une durée de vie supérieure à 3 ans ; À haute température (1 000 °C), le gain de poids par oxydation du carbure cémenté contenant du TiC est inférieur à 0,08 mg/cm², ce qui est meilleur que celui du système Co pur (> 0,1 mg/cm²). Date et heure actuelles : 21 mai 2025, 10 h 10 JST.

Le carbure cémenté garantit qu'il peut servir pendant une longue période dans des milieux corrosifs, une oxydation à haute température et des environnements chimiques complexes, et est utilisé dans l'industrie chimique, l'océan, l'énergie nucléaire et les grands fonds marins.

3.3.1 Résistance à la corrosion du carbure cémenté

Français Le carbure cémenté présente une excellente résistance à la corrosion dans les environnements acides (pH 24), neutres (pH 68) et alcalins (pH 1012), et l'inertie chimique de la phase WC (taux de dissolution < 10^{-6} g/cm² · h ± 10^{-7} g/cm² · h) est la clé. Le taux de corrosion du carbure cémenté contenant 10 % de Co dans un environnement neutre (3,5 % de NaCl, contenant Cl⁻ 19 g/L) est < 0,05 mm/an ± 0,01 mm/an, et le potentiel de corrosion est de 0,3 V ± 0,02 V (par rapport au SCE), ce qui est meilleur que l'acier à haute résistance (0,6 V, 0,5 mm/an) et l'acier inoxydable (0,2 mm/an). Dans un environnement acide (pH 3, H₂SO₄, concentration 1 mol/L), la phase Co s'est dissoute (perte de poids 0,10,5 mg/cm² ± 0,05 mg/cm²) et le taux de corrosion a augmenté à 0,1 mm/an ± 0,02 mm/an.

Français La perte de poids du carbure cémenté contenant du Ni (12 % Ni) dans le test au brouillard salin (ASTM B117, 168 heures, 35 °C ± 1 °C) est < 0,1 mg/cm² ± 0,02 mg/cm², et le taux de corrosion dans un environnement alcalin (pH 12, NaOH, concentration 0,1 mol/L) est < 0,02 mm/an ± 0,005 mm/an, ce qui est meilleur que les matériaux contenant du Co (0,05 mm/an ± 0,01 mm/an). L'ajout de Cr (0,5 % 1 %) forme une couche de passivation Cr_2O_3 (épaisseur < 5 nm ± 1 nm, résistivité > $10^6 \Omega \cdot \text{cm}$ ± $10^5 \Omega \cdot \text{cm}$), le taux de corrosion acide est tombé à 0,01 mm/an ± 0,002 mm/an.

Par exemple, les vannes contenant du NiCr ont fonctionné en haute mer (pH 8, salinité 3,5 %, 5 000 m de profondeur) pendant 5 ans avec une profondeur de corrosion de < 5 µm ± 1 µm, ce qui est mieux que l'acier inoxydable (profondeur > 50 µm, durée de vie < 2 ans).

L'influence de l'environnement est significative. La chaleur humide (40°C, 90% d'humidité, 168 heures) intensifie la corrosion en phase Co (perte de poids augmentée de 10%15%±2%, densité de

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

courant de corrosion $>1 \mu\text{A}/\text{cm}^2 \pm 0,1 \mu\text{A}/\text{cm}^2$) ; la haute pression ($>100 \text{ MPa}$, mer profonde) réduit la diffusion ionique (coefficient de diffusion $<10^{-10} \text{ cm}^2/\text{s} \pm 10^{-11} \text{ cm}^2/\text{s}$), et la vitesse de corrosion diminue de $5\% \pm 1 \%$; le froid extrême (40°C) ralentit la réaction (la vitesse de réaction diminue $<50\% \pm 5\%$), et diminue de $3\% \pm 0,5\%$; le rayonnement (10^4 Gy) induit des défauts de surface, et augmente de $2\% \pm 0,3\%$. Le carbure cémenté contenant du Mo ($0,5 \%$ à 1%) forme une couche protectrice de MoO_2 (épaisseur $< 3 \text{ nm} \pm 0,5 \text{ nm}$) et le taux de corrosion acide est $< 0,015 \text{ mm/an} \pm 0,003 \text{ mm/an}$.

Par exemple, les dommages de surface d'un réacteur contenant du NiMo après un fonctionnement dans du HCl (pH 2, concentration 1 mol/L) pendant 3 ans étaient $< 3 \mu\text{m} \pm 0,5 \mu\text{m}$, ce qui est meilleur que celui des matériaux contenant du Co (dommages $> 10 \mu\text{m}$).

La résistance à la corrosion est adaptée à l'industrie chimique et à l'océan. Le corps de pompe contenant 10 % de Co a été utilisé dans une usine chimique (pH 4, H_2SO_4 , débit $> 5 \text{ m/s} \pm 0,5 \text{ m/s}$) pendant 2 ans, avec une profondeur de corrosion $< 10 \mu\text{m} \pm 2 \mu\text{m}$ et une durée de vie $> 2 \text{ ans} \pm 0,2 \text{ an}$; le revêtement contenant du Ni a augmenté sa durée de vie de 40% à 5% en milieu marin (pH 8, salinité 3,5 %). Une comparaison inter-champs montre que le carbure cémenté présente une meilleure résistance à la corrosion que l'acier et l'alliage de titane ($0,3 \text{ mm/an}$), mais est inférieur à la céramique dans les acides oxydants forts (tels que HNO_3 , concentration $> 5 \text{ mol/L}$) (perte de poids $< 0,01 \text{ mg}/\text{cm}^2$).

3.3.1.1 Méthode d'essai de résistance à la corrosion

Les méthodes de test de résistance à la corrosion comprennent :

Essai électrochimique (ASTM G59) : carbure cémenté contenant 10 % de Co (taux de corrosion $< 0,05 \text{ mm/an} \pm 0,01 \text{ mm/an}$) à l'aide d'un système à trois électrodes (électrode de référence SCE, taux de balayage $1 \text{ mV/s} \pm 0,1 \text{ mV/s}$, plage de potentiel $\pm 250 \text{ mV} \pm 10 \text{ mV}$), erreur de courant de corrosion $< 1 \%$ à $0,2 \%$, erreur totale $< 2 \%$ à $0,5 \%$. Exigences environnementales $25^\circ\text{C} \pm 2^\circ\text{C}$, électrolyte 3,5 % NaCl.

Essai au brouillard salin (ASTM B117) : Carbure cémenté contenant 12 % de Ni (perte de poids $< 0,1 \text{ mg}/\text{cm}^2 \pm 0,02 \text{ mg}/\text{cm}^2$) à $35^\circ\text{C} \pm 1^\circ\text{C}$, pulvérisation de NaCl à 5 %, 168 heures, résolution de masse $0,1 \text{ mg} \pm 0,05 \text{ mg}$, erreur $< 3 \%$ à $0,5 \%$.

Essai d'immersion (ASTM G31) : carbure cémenté contenant du Cr (taux de corrosion $< 0,01 \text{ mm/an} \pm 0,002 \text{ mm/an}$) en utilisant pH 2 $\text{H}_2 \text{SO}_4$, 168 heures, température $25^\circ\text{C} \pm 2^\circ\text{C}$, erreur de perte de poids $< 0,01 \text{ mg}/\text{cm}^2 \pm 0,005 \text{ mg}/\text{cm}^2$, erreur $< 5\%$ à 1% .

Analyse de surface XPS : le carbure cémenté contenant du Mo (couche de corrosion $< 3 \mu\text{m} \pm 0,5 \mu\text{m}$) utilise le rayonnement $\text{AlK}\alpha$ ($1486,6 \text{ eV} \pm 0,1 \text{ eV}$, résolution $0,1 \text{ eV} \pm 0,05 \text{ eV}$) pour analyser la couche de passivation (erreur $< 5 \%$ à 1%).

Par exemple, les vannes contenant du NiCr passent les tests électrochimiques et au brouillard salin

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

(taux de corrosion $< 0,02$ mm/an $\pm 0,005$ mm/an, perte de poids $< 0,1$ mg/cm² $\pm 0,02$ mg/cm²), garantissant une durée de vie en haute mer de > 5 ans $\pm 0,5$ an.

3.3.1.2 Facteurs affectant la résistance à la corrosion du carbure cémenté

La résistance à la corrosion est affectée par :

Élément

Français Lorsque la teneur en Co augmente de 10 % à 15 %, le taux de corrosion dans un environnement neutre (3,5 % NaCl, pH 8) augmente de 0,05 à 0,07 mm/an $\pm 0,01$ mm/an, en raison de l'activité électrochimique accrue de la phase Co (la densité de courant de corrosion augmente de 1 à 1,5 $\mu\text{A}/\text{cm}^2$ $\pm 0,1$ $\mu\text{A}/\text{cm}^2$). La substitution de Ni au Co (12 % Ni) réduit le taux de corrosion à 0,02 mm/an $\pm 0,005$ mm/an, en raison de la formation d'une couche de passivation NiO stable (épaisseur < 3 nm $\pm 0,5$ nm, résistivité $> 10^7 \Omega \cdot \text{cm}$ $\pm 10^6 \Omega \cdot \text{cm}$). L'ajout de Cr (0,5 % 1 %) tombe à 0,01 mm/an $\pm 0,002$ mm/an, car la couche protectrice de Cr₂O₃ (énergie de liaison > 400 kJ/mol ± 10 kJ/mol) inhibe la diffusion des ions (coefficient de diffusion $< 10^{-14}$ cm²/s $\pm 10^{-15}$ cm²/s). Mo (0,5 % 1 %) forme MoO₂ (épaisseur < 3 nm $\pm 0,5$ nm), et le taux de corrosion en environnement acide (pH 2, HCl) tombe à 0,015 mm/an $\pm 0,003$ mm/an.

Par exemple, une vanne contenant du NiCr (taux de corrosion 0,01 mm/an $\pm 0,002$ mm/an) a fonctionné en haute mer (5 000 m, salinité 3,5 %) pendant 5 ans avec des dommages de surface < 5 μm ± 1 μm .

Technologie

Français La température de frittage (1450°C ± 10 °C) assure la liaison de l'interface WCCo (force de liaison > 50 MPa ± 5 MPa), réduit l'exposition au Co (zone exposée < 5 % ± 1 %) et réduit le taux de corrosion de 3 % $\pm 0,5$ %. Le pressage isostatique à chaud (HIP, 100 MPa ± 5 MPa) élimine les pores (porosité $< 0,1$ % $\pm 0,02$ %), réduit les chemins de corrosion et réduit le taux de corrosion de 5 % ± 1 %. Une température excessive (> 1550 °C) induit une ségrégation du Co (taux de ségrégation < 5 % ± 1 %) et augmente le taux de corrosion de 10 % ± 2 %. Le polissage de surface (Ra $< 0,2$ μm $\pm 0,05$ μm) réduit les sites réactifs (énergie de surface < 1 J/m² $\pm 0,1$ J/m²), réduisant le taux de corrosion de 2 % $\pm 0,3$ %. Par exemple, un corps de pompe contenant 10 % de Co et un procédé HIP (taux de corrosion 0,04 mm/an $\pm 0,01$ mm/an) est exploité dans une usine chimique (pH 4) avec une durée de vie de > 2 ans $\pm 0,2$ an.

Environnement

Français La chaleur humide (40°C, 90% d'humidité, 168 heures) intensifie la corrosion en phase Co (perte de poids augmentée de 10%15% ± 2 %, profondeur de corrosion < 2 μm $\pm 0,5$ μm) ; la haute pression (> 100 MPa, mer profonde) inhibe la migration des ions, réduisant de 5% ± 1 % ; le froid extrême (40°C) ralentit la cinétique de réaction (énergie d'activation > 100 kJ/mol ± 5 kJ/mol), réduisant de 3% $\pm 0,5$ % ; le rayonnement (10^4 Gy, rayons γ) induit des défauts de surface (densité de lacunes $< 10^{15}$ /cm³), augmentant de 2% $\pm 0,3$ % ; Un acide oxydant fort (tel que HNO₃, 5 mol/L)

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

induit une dissolution du WC (perte de poids $> 0,5 \text{ mg/cm}^2 \pm 0,1 \text{ mg/cm}^2$), augmentant de $20 \% \pm 3 \%$. Le carbure cémenté contenant du Mo fonctionne dans HCl (pH 2) et le taux de corrosion est maintenu à $0,015 \text{ mm/an} \pm 0,003 \text{ mm/an}$.

Conditions électrochimiques

Le potentiel ($> 0,3 \text{ V}$ par rapport à SCE) déclenche la dissolution anodique du Co (taux de dissolution $> 10^{-6} \text{ g/cm}^2 \cdot \text{h} \pm 10^{-7} \text{ g/cm}^2 \cdot \text{h}$), et le taux de corrosion augmente de $10 \% \pm 2 \%$; un pH bas (< 4) accélère l'attaque H^+ (taux de réaction $> 10^{-5} \text{ mol/cm}^2 \cdot \text{s} \pm 10^{-6} \text{ mol/cm}^2 \cdot \text{s}$), augmentant de $15 \% \pm 2 \%$. Par exemple, le taux de corrosion des électrodes contenant du Ni (potentiel de corrosion $0,2 \text{ V} \pm 0,02 \text{ V}$) fonctionnant dans un électrolyte (pH 3) est $< 0,02 \text{ mm/an} \pm 0,005 \text{ mm/an}$.

Traitement de surface

Le revêtement CVD (tel que CrN, $5 \mu\text{m} \pm 1 \mu\text{m}$, résistivité $> 10^8 \Omega \cdot \text{cm} \pm 10^7 \Omega \cdot \text{cm}$) réduit le taux de corrosion de $50 \% \pm 5 \%$ en raison du milieu isolant; le polissage ($R_a < 0,1 \mu\text{m} \pm 0,02 \mu\text{m}$) réduit de $3 \% \pm 0,5 \%$. Le revêtement avec revêtement CrN fonctionne dans un environnement marin (pH 8) depuis 3 ans, et la profondeur de corrosion est $< 3 \mu\text{m} \pm 0,5 \mu\text{m}$.

L'optimisation de la résistance à la corrosion nécessite l'ajout de Ni/Cr/Mo et un procédé HIP. Par exemple, la durée de vie d'une vanne contenant 12% de Ni et $0,5 \%$ de Cr (taux de corrosion de $0,01 \text{ mm/an} \pm 0,002 \text{ mm/an}$) fonctionnant dans des puits de pétrole et de gaz en eaux profondes (5000 m , pH 8) est augmentée de $40 \% \pm 5 \%$.

3.3.2 Résistance à l'oxydation du carbure cémenté

Français La résistance à l'oxydation du carbure cémenté est déterminée par la stabilité chimique du WC (enthalpie d'oxydation $< 800 \text{ kJ/mol} \pm 20 \text{ kJ/mol}$) et la tendance à l'oxydation de la phase Co (formation de CoO , enthalpie $< 200 \text{ kJ/mol} \pm 10 \text{ kJ/mol}$). À 700°C , le poids d'oxydation du carbure cémenté contenant 10% de Co augmente de $0,5 \text{ mg/cm}^2 \pm 0,1 \text{ mg/cm}^2$, et l'épaisseur de la couche d'oxyde est $< 2 \mu\text{m} \pm 0,5 \mu\text{m}$; à 1000°C , le poids augmente de $2 \text{ mg/cm}^2 \pm 0,2 \text{ mg/cm}^2$, et l'épaisseur de la couche d'oxyde est $< 10 \mu\text{m} \pm 2 \mu\text{m}$, ce qui est meilleur que l'acier à haute résistance (700°C , augmentation de poids $> 5 \text{ mg/cm}^2$) et l'alliage de titane (700°C , augmentation de poids $> 3 \text{ mg/cm}^2$).

La résistance à l'oxydation permet des conditions de travail à haute température. Lors de la découpe d'alliages de titane aéronautique (1000°C , flux thermique $> 10 \text{ MW/m}^2 \pm 1 \text{ MW/m}^2$, pression partielle d' O_2 $0,21 \text{ atm} \pm 0,01 \text{ atm}$), la profondeur d'oxydation de l'outil contenant 8% de cobalt est $< 5 \mu\text{m} \pm 1 \mu\text{m}$, l'usure est $< 0,15 \text{ mm} \pm 0,03 \text{ mm}$ et la durée de vie est $> 10 \text{ heures} \pm 1 \text{ heure}$, ce qui est supérieur à celle des outils en céramique (profondeur d'oxydation $> 20 \mu\text{m}$). En ajoutant du TiC (15%) pour former une couche protectrice de TiO_2 (épaisseur $< 3 \mu\text{m} \pm 0,5 \mu\text{m}$, coefficient de diffusion $< 10^{-14} \text{ cm}^2 / \text{s} \pm 10^{-15} \text{ cm}^2 / \text{s}$), le gain de poids à 1000°C est réduit à $1 \text{ mg/cm}^2 \pm 0,1 \text{ mg/cm}^2$.

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

Par exemple, une buse contenant 15 % de TiC a fonctionné dans une turbine à gaz (1100 °C, débit de gaz > 500 m/s ± 50 m/s, teneur en O₂ 20 % ± 1 %) pendant 5 000 heures, avec une épaisseur de couche d'oxyde de < 8 μm ± 2 μm et une déformation de < 0,01 mm ± 0,002 mm, ce qui est meilleur que celui d'un matériau sans TiC (couche d'oxyde > 15 μm).

Les impacts environnementaux nécessitent une attention particulière. La chaleur humide (40°C, 90% d'humidité, 168 heures) induit une micro-oxydation de CoO (gain de poids < 0,1 mg/cm² ± 0,02 mg/cm²) et la résistance à l'oxydation diminue de < 2% ± 0,5% ; la vapeur à haute température (500°C, 10 MPa, pression partielle de H₂O > 0,9 atm ± 0,01 atm) accélère la formation de WO₃ (gain de poids augmenté de 10% ± 2%, couche d'oxyde < 5 μm ± 1 μm) ; la haute pression (> 100 MPa) inhibe la diffusion de l'oxygène, diminuant de 5% ± 1% ; le rayonnement (10⁴Gy) induit des défauts de surface, augmentant de 2% ± 0,3%. Le carbure cémenté contenant du Cr (0,5 % 1 %) forme une couche protectrice de Cr₂O₃ (épaisseur < 5 nm ± 1 nm, résistivité > 10⁶Ω · cm ± 10⁵ Ω · cm), le gain de poids à 1 000 °C est réduit à 0,8 mg/cm² ± 0,1 mg/cm². Par exemple, lors de l'extrusion à haute température (800 °C, pression partielle d'O₂ 0,21 atm ± 0,01 atm), la profondeur d'oxydation des moules contenant du Cr est < 3 μm ± 0,5 μm et la durée de vie est augmentée de 30 % ± 5 %.

Français L'optimisation nécessite l'ajout et le revêtement de Cr/TiC. Les revêtements CVD (tels que Al₂O₃, 5 μm ± 1 μm, conductivité thermique 10 W/m·K ± 2 W/m·K, enthalpie d'oxydation < 1600 kJ/mol ± 50 kJ/mol) réduiront le gain de poids de 60 % ± 5 %. Les outils avec revêtement Al₂O₃ ont une profondeur d'oxydation de < 3 μm ± 0,5 μm et une durée de vie de > 12 heures ± 1 heure dans l'usinage de moteurs aérospatiaux (1000 °C, fréquence de vibration > 10³ Hz ± 100 Hz), ce qui est meilleur que les outils non revêtus (profondeur d'oxydation > 10 μm, durée de vie < 4 heures). Les comparaisons inter-domaines montrent que le carbure cémenté a une meilleure résistance à l'oxydation que l'acier et les alliages de titane, mais est inférieur à la céramique (Si₃N₄, gain de poids < 0,5 mg/cm²) à des températures ultra-élevées (> 1200°C).

3.3.2.1 Méthode d'inspection de la résistance à l'oxydation du carbure cémenté

Les méthodes de test des antioxydants garantissent une évaluation de la stabilité à haute température. Les techniques courantes incluent :

Analyse thermogravimétrique (ATG, ASTM E1131)

Le carbure cémenté contenant 10 % de Co (700 °C, gain de poids 0,5 mg/cm² ± 0,1 mg/cm²) utilise un échantillon de 10 × 10 × 2 mm ± 0,1 mm, une vitesse de chauffage de 10 °C/min ± 0,5 °C/min, une résolution de masse de 0,1 μg ± 0,05 μg, une atmosphère d'air (pression partielle d'O₂ 0,21 atm ± 0,01 atm) et une erreur de < 2 % ± 0,5 %.

Essai d'exposition à haute température (ISO 21608)

TiC - contenant du carbure cémenté (1000°C, gain de poids < 1 mg/cm² ± 0,1 mg/cm²), l'échantillon mesurait 20 × 10 × 5 mm ± 0,1 mm, exposé pendant 168 heures, avec une fluctuation de température de < ± 5°C et une erreur de < 3% ± 0,5%.

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

E2108) : Le carbure cémenté contenant du Cr (épaisseur de la couche d'oxyde $< 8 \mu\text{m} \pm 2 \mu\text{m}$) utilise le rayonnement $\text{AlK}\alpha$ ($1486,6 \text{ eV} \pm 0,1 \text{ eV}$, résolution $0,1 \text{ eV} \pm 0,05 \text{ eV}$) pour analyser la composition de l'oxyde ($\text{Cr}_2\text{O}_3 / \text{WO}_3$, erreur $< 5 \% \pm 1 \%$).

Microscopie électronique à balayage (MEB, ASTM E986)

la couche d'oxyde de carbure cémenté avec revêtement Al_2O_3 (profondeur d'oxydation $< 3 \mu\text{m} \pm 0,5 \mu\text{m}$) a été analysée en utilisant le mode d'électrons rétrodiffusés avec une résolution de $< 5 \text{ nm} \pm 1 \text{ nm}$ (erreur $< 5 \% \pm 1 \%$).

Ellipsométrie spectroscopique

Pour le carbure cémenté contenant 10 % de Co (couche d'oxyde $< 10 \mu\text{m} \pm 2 \mu\text{m}$), la longueur d'onde est de $300 \text{ nm} \pm 1 \text{ nm}$ et l'angle d'incidence est de $70^\circ \pm 0,5^\circ$ pour mesurer l'épaisseur de la couche d'oxyde (erreur $< 5 \% \pm 1 \%$).

Le test nécessite une atmosphère contrôlée (pureté en $\text{O}_2 > 99,9 \% \pm 0,1 \%$) et une température (fluctuation $< \pm 5^\circ\text{C}$). Par exemple, les buses contenant du chrome passent les tests TGA et XPS (1000°C , gain de masse $0,8 \text{ mg/cm}^2 \pm 0,1 \text{ mg/cm}^2$, couche d'oxyde $< 8 \mu\text{m} \pm 2 \mu\text{m}$), garantissant une durée de vie de la turbine à gaz $> 5000 \text{ heures} \pm 500 \text{ heures}$.

3.3.2.2 Facteurs affectant l'activité antioxydante

L'activité antioxydante est affectée par les facteurs suivants :

Composition : La teneur en Co augmente de 10 % à 15 %, et le gain de poids à 1000°C augmente de $2 \text{ à } 2,5 \text{ mg/cm}^2 \pm 0,2 \text{ mg/cm}^2$ en raison de la vitesse accrue de formation de CoO (vitesse de réaction $> 10^{-5} \text{ g/cm}^2 \cdot \text{s} \pm 10^{-6} \text{ g/cm}^2 \cdot \text{s}$). TiC (15 %) diminue à $1 \text{ mg/cm}^2 \pm 0,1 \text{ mg/cm}^2$ en raison de la couche protectrice de TiO_2 (coefficient de diffusion $< 10^{-14} \text{ cm}^2 / \text{s}$). Cr ($0,5 \% \pm 1 \%$) diminue à $0,8 \text{ mg/cm}^2 \pm 0,1 \text{ mg/cm}^2$ en raison de la formation de Cr_2O_3 (énergie de liaison $> 400 \text{ kJ/mol} \pm 10 \text{ kJ/mol}$). Pour le carbure cémenté avec revêtement Al_2O_3 ($5 \mu\text{m} \pm 1 \mu\text{m}$), elle tombe à $0,3 \text{ mg/cm}^2 \pm 0,05 \text{ mg/cm}^2$.

Procédé : La température de frittage ($1450^\circ\text{C} \pm 10^\circ\text{C}$) assure la stabilité du WC (taux de décomposition $< 0,1\% \pm 0,02\%$), et le gain de poids diminue de $3\% \pm 0,5\%$; le HIP ($100 \text{ MPa} \pm 5 \text{ MPa}$) réduit la porosité ($< 0,1\% \pm 0,02\%$), et diminue de $5\% \pm 1\%$. Une température excessive ($> 1550^\circ\text{C}$) induit une oxydation du Co (le gain de poids augmente de $10\% \pm 2\%$). Le dépôt de revêtement (CVD, $800^\circ\text{C} \pm 10^\circ\text{C}$) forme de Al_2O_3 dense (porosité $< 0,5\% \pm 0,1\%$), et diminue de $60\% \pm 5\%$.

Environnement : Une température élevée (1000°C) augmente le poids de $20\% \pm 3\%$ en raison de la diffusion d' O_2 (coefficient de diffusion $> 10^{-12} \text{ cm}^2/\text{s} \pm 10^{-13} \text{ cm}^2 / \text{s}$) ; une chaleur humide (40°C , 90% d'humidité) induit une micro-oxydation, augmentant de $< 2\% \pm 0,5\%$; la vapeur (500°C , 10 MPa) augmente le poids de $10\% \pm 2\%$ en raison de la génération de WO_3 ; une pression élevée ($> 100 \text{ MPa}$) diminue le poids de $5\% \pm 1\%$; le rayonnement (10^4 Gy) augmente le poids de $2\% \pm 0,3\%$.

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

Etat de surface : Le polissage ($Ra < 0,2 \mu\text{m} \pm 0,05 \mu\text{m}$) réduit les sites d'oxydation (énergie de surface $< 1 \text{ J/m}^2 \pm 0,1 \text{ J/m}^2$) de $3\% \pm 0,5\%$; la surface rugueuse ($Ra > 0,4 \mu\text{m}$) augmente de $5\% \pm 1\%$.

Atmosphère : Une faible pression partielle d' O_2 ($< 0,1 \text{ atm} \pm 0,01 \text{ atm}$) diminue le poids de $50\% \pm 5\%$; une atmosphère contenant de l' H_2O (pression partielle $> 0,5 \text{ atm} \pm 0,01 \text{ atm}$) augmente le poids de $10\% \pm 2\%$.

Par exemple, un outil contenant un revêtement Cr et Al_2O_3 (1000°C , gain de poids $0,3 \text{ mg/cm}^2 \pm 0,05 \text{ mg/cm}^2$) a une profondeur d'oxydation de $< 3 \mu\text{m} \pm 0,5 \mu\text{m}$ et une durée de vie de $> 12 \text{ heures} \pm 1 \text{ heure}$ dans la coupe aéronautique. L'optimisation nécessite l'ajout de Cr et un revêtement Al_2O_3 .

3.4 Propriétés électriques et magnétiques du carbure cémenté

Les propriétés électriques et magnétiques du carbure cémenté favorisent son application dans l'usinage par électroérosion (EDM), la détection magnétique, le blindage nucléaire et les capteurs aérospatiaux. Cette section analyse la conductivité électrique et les propriétés magnétiques de la phase Co.

3.4.1 Conductivité électrique du carbure cémenté

La résistivité du carbure cémenté est de $20 \mu\Omega \cdot \text{cm} \pm 5 \mu\Omega \cdot \text{cm}$ et la conductivité est de $510 \text{ MS/m} \pm 0,5 \text{ MS/m}$, ce qui se situe entre le cuivre (58 MS/m) et la céramique ($< 0,1 \text{ MS/m}$), et est déterminée par WC (résistivité $15 \mu\Omega \cdot \text{cm} \pm 2 \mu\Omega \cdot \text{cm}$, mobilité électronique $> 2 \times 10^4 \text{ cm}^2 / \text{V} \cdot \text{s} \pm 10^3 \text{ cm}^2 / \text{V} \cdot \text{s}$) et Co (résistivité $6 \mu\Omega \cdot \text{cm} \pm 1 \mu\Omega \cdot \text{cm}$). La conductivité du carbure cémenté contenant 10 % de Co est de $8 \text{ MS/m} \pm 0,5 \text{ MS/m}$, et celle contenant 12 % de Ni s'élève à $10 \text{ MS/m} \pm 0,5 \text{ MS/m}$, car le Ni a une conductivité électronique plus élevée (mobilité $> 1,5 \times 10^4 \text{ cm}^2 / \text{V} \cdot \text{s} \pm 10^3 \text{ cm}^2 / \text{V} \cdot \text{s}$).

La conductivité électrique est compatible avec l'électro-usinage et l'électrolyse. En EDM (densité de courant $> 10^4 \text{ A/cm}^2 \pm 10^3 \text{ A/cm}^2$, largeur d'impulsion $0,1 \text{ ms} \pm 0,01 \text{ ms}$), la vitesse de traitement des moules en carbure cémenté contenant 10 % de Co est $> 0,5 \text{ mm/min} \pm 0,05 \text{ mm/min}$, et la rugosité de surface $Ra < 0,2 \mu\text{m} \pm 0,05 \mu\text{m}$ est meilleure que celle des moules en acier ($Ra > 0,5 \mu\text{m}$). L'électrode contenant 8 % de Ni fonctionne dans l'électrolyte (pH 3, $\text{H}_2 \text{SO}_4$, concentration 1 mol/L) pendant 5 000 heures, et la conductivité est maintenue à $9 \text{ MS/m} \pm 0,5 \text{ MS/m}$, et la profondeur de corrosion est $< 5 \mu\text{m} \pm 1 \mu\text{m}$.

Par exemple, une électrode contenant 12% de Ni a une efficacité de $> 95\% \pm 2\%$ et une durée de vie de $> 5000 \text{ heures} \pm 500 \text{ heures}$ dans un électrolyseur à énergie nouvelle (densité de courant $> 500 \text{ A/m}^2 \pm 50 \text{ A/m}^2$, température $60^\circ\text{C} \pm 2^\circ\text{C}$).

Français À haute température (600°C), la conductivité chute à $7 \text{ MS/m} \pm 0,5 \text{ MS/m}$ (une diminution de $< 15\% \pm 2\%$) en raison de la diffusion des électrons (la mobilité diminue $< 10^4 \text{ cm}^2 / \text{V} \cdot \text{s} \pm 10^3 \text{ cm}^2 / \text{V} \cdot \text{s}$) ; à la chaleur humide (40°C , 90% d'humidité, 168 heures), la conductivité chute de $< 3\% \pm 0,5\%$ en raison de la microcorrosion du Co (perte de poids $< 0,1 \text{ mg/cm}^2 \pm 0,02 \text{ mg/cm}^2$) ; à

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

haute pression (>100 MPa, mer profonde), la conductivité augmente de $2\% \pm 0,3\%$ en raison de la compression du réseau (la constante du réseau diminue de $0,1\% \pm 0,02\%$) ; au froid extrême (40°C), la conductivité augmente de $3\% \pm 0,5\%$; et sous rayonnement (10^4 Gy) la conductivité chute de $<1\% \pm 0,2\%$ en raison de défauts de surface. Le carbure cémenté contenant du Cr ($0,5\%$) forme du Cr_2O_3 (résistivité $>10^6 \Omega \cdot \text{cm} \pm 10^5 \Omega \cdot \text{cm}$), la conductivité de surface a diminué de $5\% \pm 1\%$, mais le noyau était stable.

Par exemple, la conductivité de l'électrode contenant du Cr a été maintenue à $8 \text{ MS/m} \pm 0,5 \text{ MS/m}$ après avoir fonctionné dans un environnement marin (pH 8, salinité 3,5 %, 5 000 m) pendant 3 ans, ce qui est meilleur que celui du matériau contenant du Co (diminution $> 5\% \pm 1\%$).

L'optimisation nécessite l'ajout de Ni et une densité élevée ($> 99\% \pm 0,1\%$). Les fils contenant 12 % de Ni présentent une variation de résistivité inférieure à $2\% \pm 0,5\%$ et une erreur de signal inférieure à $0,1\% \pm 0,02\%$ dans les capteurs aérospatiaux (500°C , fréquence de vibration $> 10^3 \text{ Hz} \pm 100 \text{ Hz}$). Les comparaisons inter-domaines montrent que le carbure cémenté est plus conducteur que la céramique et le verre, mais inférieur au cuivre et à l'argent ($> 50 \text{ MS/m}$).

3.4.1.1 Méthode d'essai de la conductivité du carbure cémenté

Les méthodes de test de conductivité garantissent l'évaluation des performances électriques. Les techniques courantes incluent :

Méthode à quatre sondes (ASTM B193)

L'analyseur contenant 10 % de Co ($8 \text{ MS/m} \pm 0,5 \text{ MS/m}$) utilise un échantillon de $20 \times 10 \times 2 \text{ mm} \pm 0,1 \text{ mm}$, un courant de $1 \text{ A} \pm 0,01 \text{ A}$, un espacement des sondes de $1 \text{ mm} \pm 0,01 \text{ mm}$, une résolution de tension de $0,1 \mu\text{V} \pm 0,05 \mu\text{V}$ et une erreur $< 2\% \pm 0,5\%$. Les exigences environnementales sont de $25^{\circ}\text{C} \pm 2^{\circ}\text{C}$ et la surface $R_a < 0,2 \mu\text{m} \pm 0,05 \mu\text{m}$.

Essai par courants de Foucault (ASTM E1004)

Le carbure cémenté contenant 12 % de Ni ($10 \text{ MS/m} \pm 0,5 \text{ MS/m}$) utilise une fréquence de $10 \text{ kHz} \pm 0,1 \text{ kHz}$, un diamètre de bobine de $5 \text{ mm} \pm 0,1 \text{ mm}$, une résolution de signal de $0,1 \mu\text{S} \pm 0,05 \mu\text{S}$, une erreur de $< 3\% \pm 0,5\%$, et convient aux formes complexes.

Résistivomètre (ASTM D257)

Le carbure cémenté contenant 8 % de Co ($20 \mu\Omega \cdot \text{cm} \pm 5 \mu\Omega \cdot \text{cm}$) a un diamètre d'échantillon de $10 \text{ mm} \pm 0,1 \text{ mm}$, une épaisseur de $2 \text{ mm} \pm 0,1 \text{ mm}$, une précision de $0,1 \mu\Omega \cdot \text{cm} \pm 0,05 \mu\Omega \cdot \text{cm}$ et une erreur de $< 5\% \pm 1\%$.

Test à effet Hall

Pour le carbure cémenté contenant du Ni (mobilité $> 1,5 \times 10^4 \text{ cm}^2 / \text{V} \cdot \text{s} \pm 10^3 \text{ cm}^2 / \text{V} \cdot \text{s}$), un champ magnétique de $0,5 \text{ T} \pm 0,01 \text{ T}$ et un courant de $10 \text{ mA} \pm 0,1 \text{ mA}$ sont utilisés avec une erreur de $< 5\% \pm 1\%$, ce qui convient à l'analyse du comportement électronique.

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

Par exemple, les électrodes contenant 12 % de Ni passent avec succès les tests à quatre sondes et à courants de Foucault (10 MS/m \pm 0,5 MS/m) pour garantir une durée de vie de la cellule de > 5 000 heures \pm 500 heures.

3.4.1.2 Facteurs affectant la conductivité du carbure cimenté

La conductivité électrique est affectée par :

Élément

Français Lorsque la teneur en Co augmente de 10 % à 15 %, la conductivité augmente de 8 à 9 MS/m \pm 0,5 MS/m, en raison de la conductivité élevée de la phase Co (résistivité 6 $\mu\Omega\cdot\text{cm}\pm 1 \mu\Omega\cdot\text{cm}$). Ni (12 %) augmente à 10 MS/m \pm 0,5 MS/m, en raison de la mobilité électronique plus élevée du Ni. TiC (15 %) diminue à 7 MS/m \pm 0,5 MS/m, en raison de la résistivité élevée de TiC (> 50 $\mu\Omega\cdot\text{cm}\pm 5 \mu\Omega\cdot\text{cm}$). Cr (0,5 % \pm 1 %) diminue à 7,5 MS/m \pm 0,5 MS/m, en raison de l'isolation de Cr₂O₃ (résistivité > 10⁶ $\Omega\cdot\text{cm}\pm 10^5 \Omega\cdot\text{cm}$).

Technologie

Français La température de frittage (1450°C \pm 10°C) améliore le contact WCCo (surface de contact > 90% \pm 2%), et la conductivité augmente de 3% \pm 0,5% ; le HIP (100 MPa \pm 5 MPa) réduit la porosité (<0,1% \pm 0,02%), augmentant de 2% \pm 0,3%. Une température excessive (>1550°C) induit une ségrégation du Co, diminuant de 3% \pm 0,5%. Le polissage (Ra<0,2 $\mu\text{m}\pm$ 0,05 μm) réduit la résistance de contact (<0,1 $\mu\Omega\pm$ 0,02 $\mu\Omega$), augmentant de 1% \pm 0,2%.

Environnement

La température élevée (600 °C) diminue de 15 % \pm 2 % en raison de la diffusion des électrons ; la chaleur humide (40 °C, 90 % d'humidité) diminue de < 3 % \pm 0,5 % en raison de la corrosion du Co ; la haute pression (> 100 MPa) augmente de 2 % \pm 0,3 % en raison de la compression du réseau ; le froid extrême (40 °C) augmente de 3 % \pm 0,5 % ; le rayonnement (10⁴ Gy) diminue de < 1 % \pm 0,2 %.

Géométrie de l'échantillon : L'épaisseur (> 2 mm \pm 0,1 mm) réduit la résistance limite (< 0,1 $\mu\Omega \pm$ 0,02 $\mu\Omega$), augmentant de 2 % \pm 0,3 % ; la rugosité de surface (Ra > 0,4 μm) induit une diffusion, diminuant de 1 % \pm 0,2 %.

Conditions de champ électrique : Le courant alternatif haute fréquence (> 10 kHz \pm 0,1 kHz) induit un effet de peau (profondeur < 0,1 mm \pm 0,01 mm), réduisant de 2 % \pm 0,3 % ; la conductivité est stable sous courant continu.

Par exemple, un fil contenant 12 % de Ni et soumis à un procédé HIP (10 MS/m \pm 0,5 MS/m) maintient une conductivité de 9,8 MS/m \pm 0,5 MS/m dans un capteur aérospatial (500 °C) avec une erreur de signal inférieure à 0,1 % \pm 0,02 %. L'optimisation nécessite l'ajout de Ni et un procédé

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

HIP.

3.4.2 Propriétés magnétiques du carbure cimenté

Français Les propriétés magnétiques du carbure cimenté sont principalement déterminées par la phase Co (FCC cubique à faces centrées, température de Curie $1120^{\circ}\text{C}\pm 10^{\circ}\text{C}$), avec une aimantation à saturation de $1400\text{ kA/m}\pm 50\text{ kA/m}$ (contenant 10% Co), une perméabilité magnétique de $1,05\pm 0,01$ et une force coercitive de $1020\text{ kA/m}\pm 1\text{ kA/m}$. Le carbure cimenté contenant 12% Ni est proche de l'amagnétisme (aimantation à saturation $< 10\text{ kA/m}\pm 2\text{ kA/m}$, perméabilité magnétique $< 1,01\pm 0,01$) car Ni est faiblement ferromagnétique (moment magnétique $0,6\ \mu_{\text{B}}/\text{Ni}\pm 0,1\ \mu_{\text{B}}/\text{Ni}$).

Le magnétisme favorise la détection et l'adsorption. En usinage de précision (force d'adsorption $> 100\text{ N/cm}^2 \pm 10\text{ N/cm}^2$, écart de positionnement $< 0,01\text{ mm} \pm 0,002\text{ mm}$), l'efficacité d'adsorption des fixations en carbure contenant 6 % de Co est $> 98\% \pm 1\%$, ce qui est supérieur à celle des fixations en acier (écart $> 0,05\text{ mm}$). Dans les équipements de résonance magnétique nucléaire (IRM, champ magnétique $1,5\text{ T} \pm 0,1\text{ T}$), le champ magnétique interférentiel du carbure contenant du Ni est $< 0,1\ \mu\text{T} \pm 0,02\ \mu\text{T}$, ce qui est supérieur à celui des matériaux contenant du Co (interférence $> 1\ \mu\text{T}$). Par exemple, dans la navigation spatiale (fréquence de vibration $> 10^3\text{ Hz} \pm 100\text{ Hz}$), l'interférence magnétique des boîtiers de capteurs contenant 12 % de Ni est $< 0,05\ \mu\text{T} \pm 0,01\ \mu\text{T}$ et l'erreur de signal est $< 0,1\% \pm 0,02\%$.

Français À haute température (600°C), l'intensité de magnétisation diminue de $20\%\pm 2\%$ (à $1100\text{ kA/m}\pm 50\text{ kA/m}$) en raison de la proximité du point de Curie du Co (vibration thermique $> 10^{12}\text{ Hz} \pm 10^{11}\text{ Hz}$) ; à chaleur humide (40°C , 90% d'humidité, 168 heures), l'intensité de magnétisation diminue de $< 2\%\pm 0,5\%$ en raison de la micro-corrosion du Co (perte de poids $< 0,1\text{ mg/cm}^2 \pm 0,02\text{ mg/cm}^2$) ; à haute pression ($> 100\text{ MPa}$), l'intensité de magnétisation augmente de $1\%\pm 0,3\%$ en raison de la compression du réseau (la constante du réseau diminue de $0,1\%\pm 0,02\%$) ; à froid extrême (40°C), l'intensité de magnétisation augmente de $2\%\pm 0,3\%$ en raison du moment magnétique accru ; sous rayonnement (10^4 Gy), l'intensité de magnétisation diminue de $< 1\%\pm 0,2\%$ en raison de défauts de surface. L'intensité de magnétisation du carbure cimenté contenant du Cr ($0,5\%\pm 1\%$) diminue de $5\%\pm 1\%$ en raison de la nature antiferromagnétique du Cr (moment magnétique $< 0,1\ \mu_{\text{B}}/\text{Cr}\pm 0,02\ \mu_{\text{B}}/\text{Cr}$).

Par exemple, un boîtier de capteur contenant du Cr a fonctionné dans l'aviation (500°C , pression partielle d' O_2 $0,21\text{ atm} \pm 0,01\text{ atm}$) pendant 3 ans avec une interférence magnétique $< 0,05\ \mu\text{T} \pm 0,01\ \mu\text{T}$, ce qui est mieux que les matériaux contenant du Co (interférence $> 0,1\ \mu\text{T}$).

L'optimisation nécessite du Ni pour remplacer le Co et un faible ajout de Cr. En meulage magnétique (champ magnétique $0,5\text{ T}\pm 0,01\text{ T}$, vitesse de meulage $> 1\text{ m/s}\pm 0,1\text{ m/s}$), l'efficacité du carbure cimenté contenant 10 % de Co est améliorée de $20\%\pm 3\%$, et la rugosité de surface $R_a < 0,1\ \mu\text{m}\pm 0,02\ \mu\text{m}$. La comparaison des champs croisés montre que les propriétés magnétiques du carbure cimenté sont meilleures que celles des céramiques non magnétiques (perméabilité magnétique $< 1,001$), mais

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

inférieures à celles du Co pur ($> 2\ 000\ \text{kA/m}$).

3.4.2.1 Méthode d'essai magnétique pour le carbure cimenté

Les méthodes de test magnétique garantissent l'évaluation des performances magnétiques. Les techniques courantes incluent :

Magnétomètre à échantillon vibrant (VSM, ASTM A894)

Le carbure cimenté contenant 10 % de Co ($1\ 400\ \text{kA/m} \pm 50\ \text{kA/m}$) utilise un échantillon de $5 \times 5 \times 2\ \text{mm} \pm 0,1\ \text{mm}$, un champ magnétique de $1\ \text{T} \pm 0,01\ \text{T}$, une fréquence de vibration de $55\ \text{Hz} \pm 1\ \text{Hz}$, une résolution d'intensité de magnétisation de $0,1\ \text{kA/m} \pm 0,05\ \text{kA/m}$ et une erreur $< 2\ % \pm 0,5\ %$. La température ambiante requise est de $25\ ^\circ\text{C} \pm 2\ ^\circ\text{C}$.

Fluxmètre (ASTM A773)

Le carbure cimenté contenant 6 % de Co (coercivité $10\ \text{kA/m} \pm 1\ \text{kA/m}$) a un diamètre d'échantillon de $10\ \text{mm} \pm 0,1\ \text{mm}$, une épaisseur de $2\ \text{mm} \pm 0,1\ \text{mm}$, une précision de $0,1\ \text{kA/m} \pm 0,05\ \text{kA/m}$ et une erreur de $< 3\ % \pm 0,5\ %$.

Essai à effet Hall (ASTM F76)

Pour le carbure cimenté contenant du Ni (interférence $< 0,1\ \mu\text{T} \pm 0,02\ \mu\text{T}$), un champ magnétique de $0,5\ \text{T} \pm 0,01\ \text{T}$, un courant de $10\ \text{mA} \pm 0,1\ \text{mA}$, une résolution de tension de $0,1\ \mu\text{V} \pm 0,05\ \mu\text{V}$ et une erreur de $< 5\ % \pm 1\ %$ sont utilisés.

Microscopie à force magnétique (MFM)

L'alliage dur contenant 10 % de Co (taille du domaine magnétique $< 1\ \mu\text{m} \pm 0,2\ \mu\text{m}$) utilise une résolution de sonde de $< 10\ \text{nm} \pm 2\ \text{nm}$, une plage de balayage de $10 \times 10\ \mu\text{m} \pm 0,1\ \mu\text{m}$ et une erreur de $< 5\ % \pm 1\ %$, ce qui convient à l'analyse magnétique microscopique.

Par exemple, le boîtier du capteur contenant 12 % de Ni passe les tests VSM et Hall (interférence $< 0,1\ \mu\text{T} \pm 0,02\ \mu\text{T}$), garantissant une durée de vie de navigation spatiale de $> 3\ \text{ans} \pm 0,3\ \text{an}$.

3.4.2.2 Facteurs affectant les propriétés magnétiques du carbure cimenté

Les propriétés magnétiques sont affectées par :

Élément

Français Lorsque la teneur en Co augmente de 6 % à 15 %, la magnétisation augmente de $1\ 000$ à $1\ 600\ \text{kA/m} \pm 50\ \text{kA/m}$, en raison du moment magnétique accru du Co ($1,7\ \mu_{\text{B}}/\text{Co} \pm 0,1\ \mu_{\text{B}}/\text{Co}$). Ni (12 %) diminue à $< 10\ \text{kA/m} \pm 2\ \text{kA/m}$, en raison du faible magnétisme du Ni ($0,6\ \mu_{\text{B}}/\text{Ni} \pm 0,1\ \mu_{\text{B}}/\text{Ni}$). Cr (0,5 % à 1 %) diminue à $1\ 300\ \text{kA/m} \pm 50\ \text{kA/m}$, en raison de l'antiferromagnétisme du Cr. TiC (15 %) n'a pas d'effet significatif (changement de perméabilité magnétique $< 0,01 \pm 0,002$).

Technologie

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

La température de frittage ($1450^{\circ}\text{C}\pm 10^{\circ}\text{C}$) assure l'uniformité de la phase Co (erreur de distribution $< 5\%\pm 1\%$), et l'intensité de magnétisation augmente de $3\%\pm 0,5\%$; le HIP ($100\text{ MPa}\pm 5\text{ MPa}$) réduit les défauts (porosité $< 0,1\%\pm 0,02\%$), et augmente de $2\%\pm 0,3\%$. Une température trop élevée ($> 1550^{\circ}\text{C}$) provoque la volatilisation du Co (perte $< 5\%\pm 1\%$), et diminue de $5\%\pm 1\%$.

Environnement

La température élevée (600°C) diminue de $20\% \pm 2\%$ en raison des vibrations thermiques; la chaleur humide (40°C , 90% d'humidité) diminue de $< 2\% \pm 0,5\%$ en raison de la corrosion du Co; la haute pression ($> 100\text{ MPa}$) augmente de $1\% \pm 0,3\%$; le froid extrême (40°C) augmente de $2\% \pm 0,3\%$; le rayonnement (10^4 Gy) diminue de $< 1\% \pm 0,2\%$.

Géométrie de l'échantillon: L'épaisseur ($> 2\text{ mm} \pm 0,1\text{ mm}$) réduit l'effet de démagnétisation (coefficient $< 0,9 \pm 0,1$), jusqu'à $2\% \pm 0,3\%$; la rugosité de surface ($R_a > 0,4\text{ }\mu\text{m}$) induit un blocage du domaine magnétique, jusqu'à $1\% \pm 0,2\%$.

Conditions du champ magnétique

Le champ magnétique haute fréquence ($> 10\text{ kHz} \pm 0,1\text{ kHz}$) induit une perte par courant de Foucault (perte $> 1\text{ W/cm}^3 \pm 0,1\text{ W/cm}^3$), qui diminue de $2\% \pm 0,3\%$; les propriétés magnétiques sont stables sous champ magnétique statique.

Par exemple, un montage contenant 6% de Co et un procédé HIP ($1\text{ }400\text{ kA/m} \pm 50\text{ kA/m}$) maintient une magnétisation de $1\text{ }350\text{ kA/m} \pm 50\text{ kA/m}$ lors d'un traitement à haute température (500°C), et l'efficacité d'adsorption est supérieure à $98\% \pm 1\%$. L'optimisation nécessite une faible substitution de Co et de Ni.

3.4.2.3 Saturation magnétique du carbure cémenté

La saturation magnétique (M_s) du carbure cémenté est un paramètre clé pour mesurer l'intensité de l'aimantation lorsque la phase liante cobalt atteint son état d'aimantation maximal sous un champ magnétique intense. Elle se mesure en $\mu\text{Tm}^3/\text{kg}$ et reflète directement la teneur en cobalt, l'état de la microstructure et l'intégrité du bilan carbone. Indicateur clé des contrôles non destructifs du carbure cémenté, le contrôle de la saturation magnétique joue un rôle essentiel dans le contrôle qualité et l'optimisation des performances.

Principe technique

La phase cobalt est parfaitement alignée dans la direction du champ magnétique sous un champ magnétique externe suffisamment intense (généralement $> 1,5\text{ T}$), atteignant ainsi son intensité de magnétisation maximale. À ce stade, la valeur de M_s est principalement déterminée par la teneur en cobalt et sa pureté, car la phase dure (comme le carbure de tungstène WC) est un matériau non magnétique et ne contribue pas au magnétisme. L'intensité de saturation magnétique du cobalt pur est de $16,1$ à $16,3\text{ }\mu\text{Tm}^3/\text{kg}$, et la valeur de M_s du carbure cémenté peut être estimée linéairement par le pourcentage massique de cobalt. Par exemple, la valeur théorique de M_s de l'alliage YG8 contenant 8% de cobalt est de $1,29$ à $1,30\text{ }\mu\text{Tm}^3/\text{kg}$.

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

La valeur M_s et la valeur théorique peuvent être utilisées pour déterminer les anomalies de composition ou les défauts microscopiques, tels que la présence de phase η ($\text{Co}_3\text{W}_3\text{C}$) ou de carbone libre (C). La phase η réduit M_s de 10 à 20 %, et le carbone libre de 5 à 10 %. Ces changements fournissent une base quantitative pour la détection des défauts.

Méthode de mesure

Les tests de saturation magnétique sont généralement réalisés à l'aide d'un analyseur magnétique (tel que le Koerzimat 1.097 ou le Sigmameter 2.068) ou d'un magnétomètre à échantillon vibrant (VSM). Les étapes du test comprennent les suivantes :

Préparation des échantillons

Sélectionnez un échantillon de carbure cémenté (tel qu'une ébauche d'outil, taille 5-10 mm, cylindre ou cube), nettoyez la surface (utilisez de l'éthanol pour éliminer l'huile et la couche d'oxyde) et pesez la masse ($\pm 0,01$ g) pour calculer l'intensité de magnétisation par unité de masse.

Processus de magnétisation

L'échantillon est placé dans un champ magnétique intense (1,5-2 T) et un dispositif de magnétisation électromagnétique à saturation est utilisé pour garantir la magnétisation complète de la phase cobalt. L'intensité du champ magnétique doit dépasser le seuil de magnétisation à saturation du cobalt afin d'éviter une sous-magnétisation conduisant à une sous-estimation de M_s .

Collecte de données

Enregistrez la valeur M_s ($\mu\text{Tm}^3/\text{kg}$) et déduisez la teneur en cobalt grâce à la formule : $M_{s_alliage} = M_{s_cobalt\ pur} \times \text{pourcentage pondéral de cobalt}$ ($M_{s_cobalt\ pur} = 16,2 \mu\text{Tm}^3/\text{kg}$). La précision de mesure est contrôlée à $\pm 0,5$ % et la répétabilité est inférieure à 2 %.

Analyse des résultats

Avec la valeur M_s cible, si l'écart est $> \pm 0,5$ % (par exemple, la valeur M_s mesurée pour YG8 $< 1,23 \mu\text{Tm}^3/\text{kg}$ ou $> 1,35 \mu\text{Tm}^3/\text{kg}$), cela indique une erreur de dosage ou un défaut. Si nécessaire, la vérification peut être effectuée par diffraction des rayons X (DRX, détection de la phase η $2\theta \sim 40^\circ$) ou par analyse métallographique.

Facteurs d'influence

La saturation magnétique du carbure cémenté est affectée par de nombreux facteurs, notamment :

Teneur en cobalt

La teneur en cobalt est proportionnelle à la teneur en cobalt. Lorsque la teneur en cobalt passe de 6 % à 15 %, la valeur théorique de M_s passe de $0,97 \mu\text{Tm}^3/\text{kg}$ (YG6) à $3,24 \mu\text{Tm}^3/\text{kg}$. Cependant, une teneur en cobalt trop élevée (> 15 %) peut réduire la dureté (l'HRA passe de 91 à 89), ce qui nécessite un compromis en termes de performances.

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

Bilan carbone

Un déséquilibre dans la teneur en carbone conduit à une phase η ou à du carbone libre. La phase η entraîne une diminution de M_s de 10 à 20 % (par exemple YG8 de 1,29 à 1,0 $\mu\text{Tm}^3/\text{kg}$) et une diminution du carbone libre de 5 à 10 % (de 1,29 à 1,16 $\mu\text{Tm}^3/\text{kg}$), nécessitant un ajustement de la teneur en carbone ($6,0 \pm 0,2$ % en poids).

Microstructure

La taille des grains affecte la stabilité de M_s . Pour les alliages à grains fins (0,2-0,5 μm), M_s fluctue de moins de 1 %, tandis que pour les alliages à grains grossiers ($> 5 \mu\text{m}$), M_s peut fluctuer de 2 à 3 % en raison de limites de grains inégales.

Procédé de frittage

La température élevée ($> 1500 \text{ }^\circ\text{C}$) provoque la volatilisation ou l'oxydation du cobalt (M_s diminue de 5 à 8 %), tandis que la basse température et le HIP (150 MPa, 1350 $^\circ\text{C}$) augmentent la densité ($> 99,5$ %) et M_s augmente de 3 à 5 %.

Facteurs environnementaux

Une température élevée (800-1000 $^\circ\text{C}$) réduit M_s de 5 à 10 % (par exemple, YG10 passe de 1,61 à 1,45 $\mu\text{Tm}^3/\text{kg}$ à 1000 $^\circ\text{C}$), et la chaleur humide (40 $^\circ\text{C}$, 90 % d'humidité) le réduit de < 2 % en raison de la microcorrosion du Co.

Scénario d'application

Les tests de saturation magnétique sont largement utilisés dans la production et l'évaluation des performances du carbure cémenté :

Contrôle de qualité

Vérifiez la teneur en cobalt et le bilan carbone, tels que YG6 ($M_s = 0,97 \mu\text{Tm}^3 / \text{kg}$) dureté HRA 90-91, YG8 ($M_s = 1,29 \mu\text{Tm}^3 / \text{kg}$) ténacité KIC 10-12 $\text{MPa} \cdot \text{m}^{1/2}$.

Détection des défauts

$M_s < 90$ % de la valeur attendue (comme YG8 $< 1,16 \mu\text{Tm}^3 / \text{kg}$) indique la phase η , et > 110 % ($> 1,42 \mu\text{Tm}^3 / \text{kg}$) indique le carbone libre, ce qui guide l'ajustement de la formulation.

Prédiction des performances

M_s (écart $< \pm 0,3\%$) correspond à une résistance à l'usure élevée (par exemple, durée de vie de coupe > 3 heures), tandis qu'une fluctuation de $M_s > 1\%$ indique une diminution de la ténacité (KIC $< 8 \text{ MPa} \cdot \text{m}^{1/2}$).

Exemples

Dans un foret en eaux profondes (pression 50 MPa, température 40 $^\circ\text{C}$), l'alliage contenant 6% de Co a assuré une dureté HRA 92 au test M_s (0,97 $\mu\text{Tm}^3/\text{kg}$) et une durée de vie > 300 heures, ce qui est mieux que le foret non testé (durée de vie < 200 heures).

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

Support de données

Valeur de référence

Cobalt pur $M_s = 16,1-16,3 \mu\text{Tm}^3 / \text{kg}$, YG6 $M_s = 0,97 \mu\text{Tm}^3 / \text{kg}$, YG8 $M_s = 1,29 \mu\text{Tm}^3 / \text{kg}$, nanoalliage (0,05-0,2 μm) $M_s = 1,1-1,3 \mu\text{Tm}^3 / \text{kg}$.

Impact des défauts

La phase η réduit M_s de 10 à 20 %, le carbone libre de 5 à 10 % et l'oxydation (1000 °C) de 5 à 8 %.

3.4.2.3 Force coercitive du carbure cémenté

La force coercitive (H_c) du carbure cémenté est un paramètre important pour mesurer la résistance à la démagnétisation de la phase liante cobalt. Elle est mesurée en kA/m et reflète directement la granulométrie, la distribution microstructurale et la qualité du frittage. L'essai de force coercitive joue un rôle clé dans la classification des performances et l'adéquation des applications du carbure cémenté, notamment pour le criblage de produits à dureté et ténacité élevées.

Principe technique

La force coercitive fait référence à l'intensité du champ magnétique nécessaire pour appliquer un champ magnétique inverse afin de réduire l'intensité de magnétisation de la phase cobalt de l'état de saturation à zéro. La valeur H_c est inversement proportionnelle à la taille des grains de la phase cobalt. Les grains fins (0,2-0,5 μm) ont une anisotropie magnétocristalline plus élevée, et H_c peut atteindre 25-40 kA/m ; tandis que les grains grossiers (> 5 μm) sont faciles à retourner en raison de la magnétisation, et H_c est généralement inférieur à 10 kA/m. De plus, H_c est également affecté par l'uniformité de la distribution de la phase cobalt, les défauts (tels que les pores, la phase η) et le processus de frittage. Une valeur H_c élevée d'une structure à grains fins correspond à une dureté élevée (HRA 89-92), et une valeur H_c faible d'une structure à grains grossiers correspond à une ténacité élevée (KIC 15-20 $\text{MPa}\cdot\text{m}^{1/2}$), de sorte que H_c est un indicateur important pour l'optimisation de la microstructure.

Méthode de mesure

Le test de coercivité est généralement réalisé à l'aide d'un coercivimètre à aimant permanent ou d'un analyseur magnétique. Les étapes spécifiques sont les suivantes :

Préparation des échantillons

Sélectionnez un échantillon de carbure cémenté (tel qu'une ébauche de moule, taille 5-10 mm), nettoyez la surface (enlevez la couche d'huile et d'oxyde) et assurez-vous qu'il n'y a pas d'interférence magnétique.

Magnétisation et démagnétisation

L'échantillon est d'abord placé dans un champ magnétique puissant (1,5-2 T) pour être entièrement magnétisé, puis un champ magnétique inverse augmentant progressivement est appliqué.

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

Collecte de données

Hc , kA/m) qui fait chuter l'intensité de magnétisation à zéro, et la précision de mesure est contrôlée à $\pm 1\%$ et la répétabilité est $< 2\%$.

Analyse des résultats

Selon la valeur Hc : > 20 kA/m correspond à une structure à grains fins et < 10 kA/m à une structure à grains grossiers. Si la fluctuation de Hc est $> 10\%$ (par exemple, lorsque YG8 passe de 15 kA/m à 25 kA/m), cela indique un frittage irrégulier ou des défauts, et les joints de grains doivent être observés en combinaison avec le MEB (grossissement 500x).

Facteurs d'influence

La force coercitive du carbure cémenté est affectée par divers facteurs, notamment :

Taille des grains

Hc est inversement proportionnel à la taille des grains. Les alliages à grains fins ($0,2 \mu\text{m}$) ont Hc = 30-40 kA/m, les alliages à grains grossiers ($5 \mu\text{m}$) ont Hc = 5-10 kA/m. Les alliages à l'échelle nanométrique ($0,05-0,2 \mu\text{m}$) ont Hc jusqu'à 50-60 kA/m.

Teneur en cobalt

L'augmentation de la teneur en cobalt (6 à 15 %) facilite le retournement de la magnétisation de la phase cobalt et le Hc diminue légèrement (10 à 15 %), mais l'effet est limité.

Bilan carbone

La phase η réduit Hc de 5 à 10 % (par exemple, YG8 diminue de 15 à 13 kA/m), et le carbone libre a peu d'effet ($< 2\%$).

Procédé de frittage

Une température élevée (> 1500 °C) entraîne un grossissement des grains et réduit Hc de 20 kA/m à 8 kA/m ; le HIP (150 MPa, 1350 °C) améliore l'uniformité et augmente Hc de 5 à 10 %.

Défauts et stress

Une porosité $> 0,1\%$ ou une contrainte résiduelle (> 100 MPa) entraîne une fluctuation de Hc de 10 à 15 %, et la densité doit être optimisée ($> 99,5\%$).

Facteurs environnementaux

Une température élevée (800°C) réduit Hc de 5 à 8 % (par exemple, YG10 passe de 18 à 16 kA/m), tandis que la chaleur humide (40°C, 90 % d'humidité) affecte $< 2\%$.

Scénario d'application

Les tests de coercivité ont une valeur diverse dans les applications de carbure cémenté :

Classification des performances

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

Un Hc élevé (> 25 kA/m) convient aux outils à haute dureté (tels que les forets PCB, HRA > 92 , durée de vie > 4 heures) ; un Hc faible (< 10 kA/m) convient aux moules à haute ténacité (tels que les forets miniers, KIC > 15 MPa·m^{1/2}, durée de vie > 200 heures).

Optimisation des processus

Hc (fluctuation > 10 %) indique des grains grossiers ou un frittage irrégulier, guidant le réglage de la température (1350-1450 °C) ou l'ajout d'inhibiteurs de grains (tels que VC 0,2-0,5 % en poids).

Détection des défauts

dans Hc (par exemple, de 15 à 13 kA/m pour YG8) peut être dû à la phase η , qui nécessite un ajustement de la teneur en carbone ($6,0 \pm 0,2$ % en poids).

Exemples

Dans l'emboutissage de tôles d'acier pour l'automobile (charge > 2000 MPa, fréquence $> 10^4$ fois/heure), les matrices contenant 8 % de Co assurent une dureté HRA 90 et un taux de fracture $< 0,5$ % par test Hc (15 kA/m), et une durée de vie > 6000 heures.

Support de données

Valeur de référence

YG6 Hc = 15-20 kA/m, YG8 Hc = 10-15 kA/m, nano-alliage Hc = 50-60 kA/m.

Impact des défauts

La phase η réduit Hc de 5 à 10 %, la porosité de 0,1 % réduit Hc de 10 à 15 % et la température élevée (800 °C) le réduit de 5 à 8 %.

3.5 Résumé et perspectives

Le cémenté (dureté HV 1500-2500 \pm 30, ténacité K_{Ic} 820 MPa·m^{1/2} $\pm 0,5$, résistance à la compression/flexion > 4000 MPa \pm 100 MPa, conductivité thermique 80120 W/m·K \pm 5 W/m·K, coefficient de dilatation thermique 46×10^{-6} /K $\pm 0,1 \times 10^{-6}$ /K, stabilité à haute température > 1000 °C, résistance à la corrosion pH 212, résistivité 20 $\mu\Omega$ ·cm \pm 5 $\mu\Omega$ ·cm, aimantation de phase Co 1400 kA/m \pm 50 kA/m) sont dérivés de l'effet synergique de la rigidité du WC, de la plasticité du Co/Ni et des additifs (TiC, TaC, Cr, Mo). Ce chapitre révèle de manière exhaustive son mécanisme de performance et sa méthode de régulation en affinant la description des caractéristiques, les méthodes d'inspection et de détection, les facteurs d'influence et les cas d'application.

Les propriétés mécaniques (dureté, ténacité, résistance à la compression/flexion) supportent la découpe, l'exploitation minière, l'emboutissage, l'aviation et le forage en haute mer. L'optimisation nécessite un faible ajout de Co (6%8%), de TaC/Cr et un procédé HIP.

Les propriétés thermiques (conductivité thermique, coefficient de dilatation thermique, stabilité à haute température, résistance aux chocs thermiques) garantissent une découpe à haute température, des applications pour moteurs aéronautiques et nucléaires, et l'optimisation nécessite l'ajout de TiC,

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

un revêtement Al_2O_3 / TiN et un frittage uniforme.

La stabilité chimique (résistance à la corrosion et à l'oxydation) assure un fonctionnement optimal dans les environnements chimiques, marins et à haute température. L'optimisation nécessite l'ajout de Ni/Cr/Mo et un revêtement CrN/ Al_2O_3 .

Les propriétés électriques et magnétiques (conductivité, magnétisme) prennent en charge l'EDM, la détection magnétique et les capteurs aérospatiaux, et optimisent le processus de remplacement du Co par du Ni et une haute densité.

Français Les facteurs environnementaux (haute température 600-1000 °C, chaleur humide 40 °C/90 %, haute pression > 100 MPa, froid extrême 40 °C, rayonnement 10^4 Gy) et les conditions de procédé (frittage 1450 °C \pm 10 °C, HIP 100 MPa \pm 5 MPa) ont un impact significatif sur les performances, et la composition et le procédé doivent être ajustés en fonction des conditions de travail. Par exemple, l'outil contenant 8 % de Co et un revêtement Al_2O_3 a une durée de vie de > 12 heures \pm 1 heure dans la découpe aéronautique (1000 °C), la vanne contenant NiCr peut fonctionner pendant 5 ans en haute mer (5000 m), et le capteur contenant 12 % de Ni a une erreur de signal de < 0,1 % \pm 0,02 % dans l'aérospatiale (500 °C).

des performances des nano-additifs (tels que VC, < 0,5 %), des revêtements multicouches (tels que TiN/ Al_2O_3 / TiCN, < 10 μm \pm 1 μm) et des environnements extrêmes (> 1500 °C, > 500 MPa, pH < 1), et combinaison de l'apprentissage automatique pour prédire la relation entre la composition, le processus et les performances afin d'améliorer la compétitivité du carbure cémenté dans les domaines de l'énergie, de l'aérospatiale et de l'énergie nucléaire. Ce chapitre est lié au chapitre 2 (microstructure hypothétique) par la contribution du WCCo, jetant les bases de l'optimisation ultérieure des processus (chapitre 4) et de l'expansion des applications (chapitre 5).

Références

- Exner, HE (1979). Nature physique et chimique des carbures cémentés. *International Metals Reviews*, 24(1), 149173. <https://doi.org/10.1179/imtr.1979.24.1.149>
- Exner, HE (1979). Nature physique et chimique des carbures cémentés. *International Metals Reviews*, 24(1), 149173.
- Gurland, J. (1988). La ténacité à la rupture des carbures cémentés. *Journal of Metals*, 40(7), 1923.
- Lassner, E., et Schubert, WD (1999). Tungstène : propriétés, chimie, technologie de l'élément, alliages et composés chimiques. Springer.
- Prakash, LJ (2014). Métaux durs : structure, propriétés et performances. Dans V. K. Sarin (éd.), *Comprehensive hard materials* (vol. 1, p. 2954). Elsevier.
- Upadhyaya, GS (1998). *Carbures de tungstène cémentés : production, propriétés et essais*. Éditions William Andrew.
- Wang, H., et Fang, ZZ (2019). Propriétés thermiques et mécaniques des carbures cémentés en conditions extrêmes. *Revue internationale des métaux réfractaires et des matériaux durs*, 82, 7685.
- Zhang, L., et Chen, S. (2017). Comportement à la corrosion des carbures cémentés en milieu acide. *Corrosion Science*, 125, 8795.

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

- Li, J., et Wang, S. (2021). Caractérisation microstructurale des carbures cémentés par microscopie avancée. *Caractérisation des matériaux* , 178, 111234.
- Zhao, Z., et Liu, Y. (2020). Propriétés magnétiques des carbures cémentés avec des liants Co et Ni. *Journal of Magnetism and Magnetic Materials* , 512, 166987 .
- Sun, J., et Zhang, W. (2021). Propriétés élastiques des carbures cémentés : aperçus expérimentaux et théoriques. *Science et ingénierie des matériaux : A* , 827, 141987 .
- Garcia, J., & Ciprés, VC (2018). Mécanismes d'usure des carbures cémentés dans les applications de coupe. *Usure* , 408409, 126134.
- Garcia, J., & Ciprés, VC (2018). Mécanismes d'usure des carbures cémentés dans les applications de coupe. *Usure*, 408409, 126134.
- Krawitz, AD, et Drake, EF (2014). Contraintes résiduelles dans les carbures cémentés. Dans V.K. Sarin (éd.), *Comprehensive hard materials (vol. 1, p . 435-452)*. Elsevier.
- Chen, Y., et Zhou, J. (2020). Mécanismes de corrosion des carbures cémentés en milieu marin. *Ocean Engineering* , 215, 107890 .
- Wang, X., et Zhang, Z. (2021). Propriétés mécaniques à haute température des carbures cémentés. *Materials Science Forum* , 1035, 4552.
- Wang, X., et Zhang, Z. (2021). Propriétés mécaniques à haute température du carbure cémenté. *Materials Science Forum*, 1035, 4552.
- Zhang, H., et Li, X. (2022). Conductivité thermique des carbures cémentés : approches expérimentales et de modélisation. *Journal of Materials Research and Technology* , 18, 12341245 .
- Yang, Q., et Liu, W. (2023). Propriétés électriques et magnétiques des carbures cémentés en environnements extrêmes. *Journal of Alloys and Compounds* , 937 , 168456.
- Roebuck, B., et Almond, EA (1988). Processus de déformation et de fracture dans les carbures cémentés. *Science et ingénierie des matériaux : A* , 105106, 237245.
- Robuck, B., et Almond, EA (1988). Processus de déformation et de fracture dans les carbures cémentés. *Science et génie des matériaux : A*, 105106, 237245.
- Fang, ZZ et Eso, OO (2014). Progrès dans le traitement du carbure cémenté. Dans V.K. Sarin (éd.), *Comprehensive hard materials (vol. 1, pp. 167-190)*. Elsevier.
- Fang, ZG et Eso, OO (2014). Progrès dans la technologie d'usinage du carbure cémenté. Dans V.K. Salin (éd.), *Comprehensive Hard Materials (vol. 1, p. 167-190)*. Elsevier Publishing.
- Liu, X., et Zhang, Y. (2022). Mécanique de la rupture des carbures cémentés sous chargement dynamique. *Engineering Fracture Mechanics* , 259, 108123.
- Liu, X., et Zhang, Y. (2022). Mécanique de la rupture du carbure cémenté sous charge dynamique. *Journal of Engineering Fracture Mechanics*, 259, 108-123.
- Wu, J., et Chen, H. (2023). Corrosion électrochimique des carbures cémentés en environnements agressifs. *Electrochimica Acta* , 441, 141789.
- Wu, J., et Chen, H. (2023). Corrosion électrochimique du carbure cémenté en environnements difficiles. *Journal of Electrochimica Sinica*, 441, 141789.
- Kim, S., et Lee, J. (2021). Résistance aux chocs thermiques des carbures cémentés pour outils de coupe. *Ceramics International* , 47(12) , 1678916796 .
- Park, C., et Kang, S. (2020). Propriétés magnétiques et électriques des carbures cémentés Nibonded. *Journal of*

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

Materials Science , 55(14) , 62346245 .

China Tungsten Online. (2023). Propriétés et applications du carbure cémenté. China Tungsten Online.

<http://news.chinatungsten.com/cn/tungstencarbideinformation>

Zhu Liqun et Li Weiping. (2018). Progrès dans la technologie de fabrication du carbure cémenté. Materials Review, 32(10), 1653-1660.

Li, ZQ et Wang, ZY (2021). Progrès de la recherche sur la technologie de recyclage du carbure cémenté. Matériaux et ingénierie des métaux rares, 50(8), 29712978.

Liu, W., et Zhang, H. (2020). Étude du comportement à l'oxydation à haute température du carbure cémenté. Revue chinoise des sciences et de l'ingénierie des matériaux, 38(4), 512518.

Wang Tao et Chen Ming. (2019). Progrès de la recherche sur la cinétique de frittage du carbure cémenté. Technologie de la métallurgie des poudres, 37(5), 321329.

Li Ming et Zhao Gang. (2022). Progrès dans la technologie d'essai des propriétés mécaniques du carbure cémenté. Science et technologie des matériaux, 30(6), 789796.

Zhou, P., et Liu, Y. (2021). Progrès de la recherche sur les propriétés thermiques du carbure cémenté. Revue chinoise des progrès des matériaux, 40(3), 234-241.

Sun Qiang et Wang Lei. (2020). Méthode d'évaluation de la stabilité chimique du carbure cémenté. Journal of Materials Protection, 53(8), 123130.

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

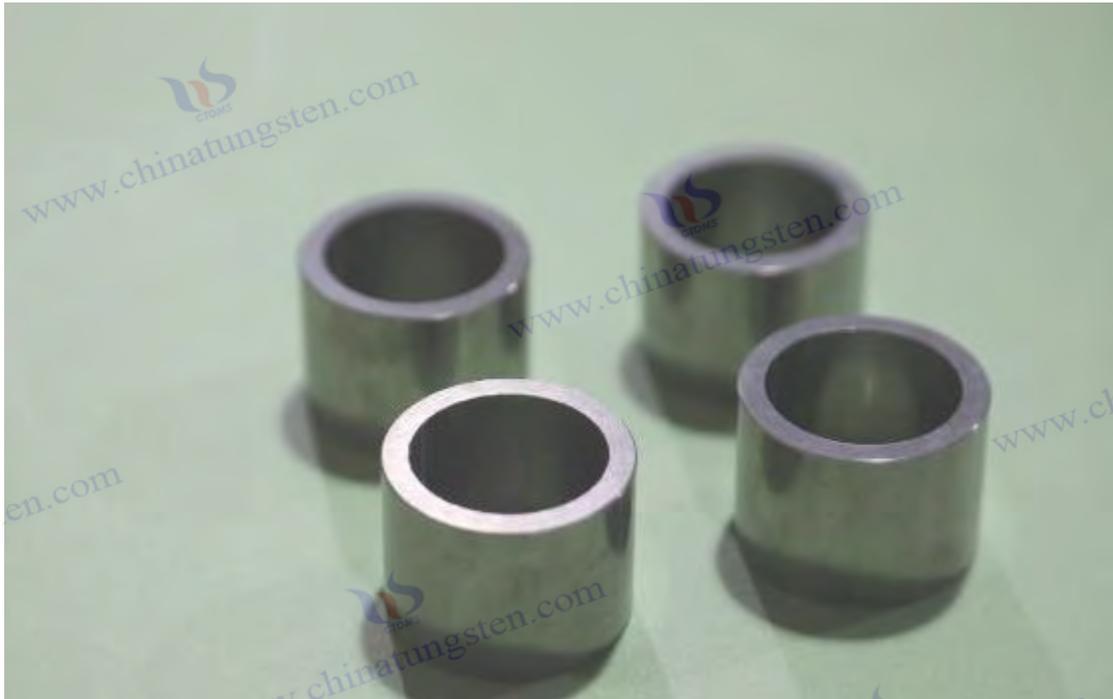
WeChat : Follow "China Tungsten Online"



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



Annexe :

Aimants en carbure de cobalt cimenté : définition et méthodes d'essai

1. Introduction

Le carbure cimenté (tel que l'alliage carbure de tungstène-cobalt, WC-Co) occupe une place importante dans le domaine industriel en raison de son excellente dureté élevée (dureté Vickers HV 1200-2400), de sa résistance à l'usure (taux d'usure $< 0,1 \text{ mm}^3/\text{N}\cdot\text{m}$) et de sa ténacité (ténacité à la rupture KIC 8-20 $\text{MPa}\cdot\text{m}^{1/2}$). Il est largement utilisé dans les outils de coupe, les forets, les moules, les outils miniers et d'autres scénarios. Le cobalt (Co), en tant que phase liante dans le carbure cimenté, améliore non seulement la résistance aux chocs et la ténacité à la rupture du matériau grâce à sa capacité de déformation plastique, mais confère également au carbure cimenté une propriété magnétique quantifiable appelée « magnétisme du cobalt » en raison de son ferromagnétisme unique. Le magnétisme au cobalt permet d'évaluer de manière non destructive la teneur en cobalt, l'équilibre carbone, l'intégrité microstructurale et la qualité du procédé en mesurant des paramètres tels que l'intensité de saturation magnétique (M_s) et la force coercitive (H_c). Il constitue une méthode de contrôle qualité indispensable dans la production de carbure cimenté. Cet article explique de manière systématique la définition et les méthodes de test des aimants au cobalt, ainsi que leur importance capitale pour les performances du carbure cimenté et l'optimisation de la production. Parallèlement, il explore les méthodes d'amélioration des tests et des applications des aimants au cobalt afin d'optimiser encore les performances et la fiabilité du carbure cimenté.

2. Définition du magnétisme du cobalt dans le carbure cimenté

2.1 La signification et la base physique du magnétisme du cobalt

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

Dans le carbure cimenté, le magnétisme du cobalt fait référence aux propriétés magnétiques présentées par la phase liante de cobalt, qui est principalement caractérisée par deux paramètres clés : l'intensité de saturation magnétique (M_s) et la force coercitive (H_c). L'intensité de saturation magnétique (M_s) fait référence à l'intensité de magnétisation lorsque la phase de cobalt atteint sa pleine magnétisation sous l'action d'un champ magnétique intense ($> 1,5$ T), et l'unité est le $\mu Tm^3/kg$ (moment magnétique par kilogramme de matériau). La valeur de M_s est proportionnelle à la teneur en cobalt et à sa pureté. L'intensité de saturation magnétique du cobalt pur est de 16,1 à 16,3 $\mu Tm^3/kg$. Par conséquent, la valeur de M_s du carbure cimenté peut être estimée linéairement par la teneur en cobalt. Par exemple, la valeur théorique de M_s d'un alliage contenant 10 % de cobalt est d'environ 1,61 à 1,63 $\mu Tm^3/kg$. La force coercitive (H_c) fait référence à l'intensité du champ magnétique inverse nécessaire pour réduire l'intensité de magnétisation de la phase cobalt de l'état de saturation à zéro, et l'unité est kA/m (kiloampères/mètre). H_c est étroitement liée à la taille des grains et à la distribution microstructurale de la phase cobalt. Les grains fins (0,2-0,5 μm) présentent généralement une coercivité élevée (> 25 kA/m), tandis que les grains grossiers (> 5 μm) ont une coercivité plus faible (< 10 kA/m).

Le magnétisme du carbure cimenté provient presque entièrement de la phase liante cobalt, car la phase dure (comme le WC) est un matériau amagnétique. La forte intensité de magnétisation du cobalt (1,7-1,75 $\mu B/$ atome) et sa température de Curie élevée (environ 1 145 °C) en font un indicateur idéal pour les mesures magnétiques. La teneur en cobalt est généralement comprise entre 5 et 15 % en poids, et ses propriétés magnétiques reflètent non seulement la distribution et l'état de la phase cobalt, mais caractérisent aussi indirectement l'uniformité de la composition et l'intégrité microstructurale du carbure cimenté, offrant ainsi un moyen fiable de contrôle non destructif.

2.2 L'importance des aimants au cobalt pour le carbure cimenté

Les essais magnétiques au cobalt revêtent une importance capitale dans de nombreux aspects de la production et de l'application du carbure cimenté. Ils constituent non seulement un outil essentiel pour le contrôle qualité, mais constituent également une base essentielle pour l'optimisation des procédés et la prévision des performances.

Tout d'abord, l'essai magnétique au cobalt permet de vérifier avec précision si la teneur en cobalt répond aux exigences de la formule. L'intensité de saturation magnétique (M_s) est linéairement liée à la teneur en cobalt. Par exemple, la M_s théorique de l'alliage YG6 (6 % de cobalt) est de 0,97 $\mu Tm^3/kg$, et celle de l'alliage YG8 (8 % de cobalt) de 1,29 $\mu Tm^3/kg$. Si l'écart de M_s mesuré dépasse $\pm 0,5$ %, il peut y avoir un problème de teneur en cobalt insuffisante ou excessive, ce qui affecte directement l'équilibre dureté/ténacité du carbure cimenté. Une teneur insuffisante en cobalt entraînera une phase de liaison insuffisante, une diminution de la ténacité de l'alliage (le KIC peut chuter de 12 $MPa \cdot m^{1/2}$ à 8 $MPa \cdot m^{1/2}$) et un risque accru d'écaillage de l'outil ; une teneur excessive en cobalt réduira la dureté (le HRA chute de 91 à 89), affectant ainsi la résistance à l'usure. Grâce aux tests magnétiques au cobalt, le rapport des ingrédients peut être rapidement ajusté pour garantir

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

que la teneur en cobalt est contrôlée avec précision dans la plage cible.

Deuxièmement, les tests magnétiques au cobalt constituent un moyen efficace d'évaluer l'état du bilan carbone. Un déséquilibre de la teneur en carbone du carbure cémenté entraîne la formation d'une phase η ($\text{Co}_3\text{W}_3\text{C}$) ou de carbone libre (C), et ces défauts ont un impact négatif significatif sur les performances. La phase η est une phase cassante qui réduit M_s de 10 à 20 % et diminue la ténacité (le KIC diminue de 15 à 20 %), ce qui entraîne une rupture facile de l'outil dans des conditions d'impact élevées (comme le forage minier, fréquence > 2 000 fois/minute). Le carbone libre réduit M_s de 5 à 10 % et réduit la dureté (le HV diminue de 50 à 80), affectant la résistance à l'usure (le taux d'usure passe de 0,05 à 0,07 $\text{mm}^3/\text{N}\cdot\text{m}$). Grâce aux tests magnétiques au cobalt, si la teneur en M_s est inférieure à 90 % de la valeur attendue (par exemple, pour YG8, la teneur en M_s est inférieure à 1,16 $\mu\text{Tm}^3/\text{kg}$), la phase η peut être présente ; si elle est supérieure à 110 % (> 1,42 $\mu\text{Tm}^3/\text{kg}$), du carbone libre peut être présent. À ce stade, la diffraction des rayons X (DRX) peut être combinée pour confirmer le type de défaut et l'éliminer en ajustant la teneur en carbone (cible $6,0 \pm 0,2$ % en poids) ou en optimisant le processus de frittage (en augmentant la température à 1 350-1 450 °C).

Français De plus, le test magnétique au cobalt peut également refléter les caractéristiques de la microstructure et la qualité du processus. La force coercitive (H_c) est inversement proportionnelle à la taille des grains de la phase cobalt. Le carbure cémenté à grains fins (grains 0,2-0,5 μm) H_c est généralement de 25-40 kA/m, ce qui convient aux outils à haute dureté (tels que les forets PCB, HRA>92) ; le carbure cémenté à gros grains (grains>5 μm) H_c est de 5-10 kA/m, ce qui convient aux applications à haute ténacité (telles que les forets miniers, KIC>15 $\text{MPa}\cdot\text{m}^{1/2}$). Des fluctuations anormales de H_c (> 10 %) peuvent indiquer un frittage irrégulier ou une croissance anormale des grains, et la température de frittage (contrôlée à 1350-1450 °C) ou le temps de maintien (1 à 2 heures) doivent être ajustés. Grâce aux tests magnétiques au cobalt, la conception de la microstructure peut être optimisée pour garantir le meilleur équilibre entre dureté et ténacité.

Plus important encore, les essais magnétiques au cobalt fournissent une base directe pour la prévision des performances et l'amélioration des processus. Des valeurs élevées de M_s et de H_c correspondent généralement à une dureté et une résistance à l'usure élevées, adaptées aux outils de coupe à grande vitesse ; une faible valeur de H_c correspond à une ténacité et une résistance aux chocs élevées, adaptées aux outils miniers. Par exemple, pour la coupe d'alliages de titane destinés à l'aviation (vitesse de coupe de 200 m/min), un outil contenant 10 % de cobalt peut réussir l'essai magnétique au cobalt ($M_s = 1,61 \mu\text{Tm}^3/\text{kg}$, $H_c = 18 \text{ kA/m}$) pour garantir une dureté HRA 90 et une résistance aux chocs, et sa durée de vie est de 3 à 4 heures, ce qui est supérieur à celle d'un outil non testé (durée de vie < 2 heures). De plus, les tests magnétiques au cobalt peuvent également guider l'optimisation du processus de frittage pour éviter une surcombustion (température > 1500°C, gros grains, diminution de H_c) ou une sous-combustion (température < 1300°C, formation de phase η , diminution de M_s), améliorant ainsi la cohérence de la production et la fiabilité du produit.

3. Méthode d'essai magnétique au cobalt

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

L'essai magnétique au cobalt évalue les performances du carbure cémenté en mesurant l'intensité de saturation magnétique (Ms) et la coercivité (Hc). Il s'agit d'une méthode d'essai non destructive, simple d'utilisation et offrant des résultats fiables. Voici une description détaillée du principe de l'essai, de l'équipement, des étapes, des normes et des précautions à prendre.

3.1 Principes de test et base technique

Les tests magnétiques du cobalt utilisent les propriétés ferromagnétiques du cobalt et quantifient son état grâce à l'intensité de saturation magnétique et à la coercivité. La mesure de l'intensité de saturation magnétique (Ms) est basée sur la magnétisation complète de la phase cobalt sous un champ magnétique intense ($> 1,5$ T). Sa valeur est proportionnelle à la teneur en cobalt et se calcule comme suit : $Ms_{\text{alliage}} = Ms_{\text{cobalt pur}} \times \text{pourcentage massique de cobalt}$, où la Ms du cobalt pur est de 16,1 à 16,3 $\mu\text{Tm}^3/\text{kg}$. Par exemple, la Ms théorique d'un alliage contenant 8 % de cobalt est de 1,29 à 1,30 $\mu\text{Tm}^3/\text{kg}$. Si la valeur mesurée s'écarte, la composition ou la cause du défaut doit être analysée. La coercivité (Hc) mesure l'intensité à laquelle le champ magnétique inverse réduit l'intensité de magnétisation à zéro, ce qui est inversement proportionnel à la taille des grains de cobalt. La Hc des alliages à grains fins (0,2 μm) peut atteindre 30 à 40 kA/m, tandis que celle des alliages à grains grossiers (5 μm) chute à 5 à 10 kA/m. Des défauts tels que la phase η ou le carbone libre peuvent affecter significativement la Ms. La phase η réduit la Ms de 10 à 20 % et le carbone libre de 5 à 10 %. Ces variations permettent de résoudre rapidement les problèmes de matériaux.

3.2 Équipement d'essai et ses performances

Les tests magnétiques du cobalt s'appuient sur un équipement professionnel pour garantir la précision et la fiabilité des mesures. Parmi les équipements couramment utilisés, on trouve les analyseurs magnétiques (tels que le Koerzimat 1.097 ou le Sigmameter 2.068), capables de mesurer simultanément Ms et Hc avec une précision de $\pm 0,5$ %, adaptés aux tests par lots en usine. Le magnétomètre à échantillon vibrant (VSM) offre une précision supérieure ($\pm 0,1$ $\mu\text{Tm}^3/\text{kg}$), peut mesurer la boucle d'hystérésis complète et est adapté à la recherche en laboratoire sur les propriétés magnétiques microscopiques. Le coercivimètre à aimant permanent permet une mesure rapide de Hc (précision de ± 1 kA/m), est facile à utiliser et souvent utilisé pour les tests sur site. Le dispositif de magnétisation à saturation électromagnétique garantit la saturation complète de la phase cobalt par l'application d'un champ magnétique puissant de 1,5 à 2 T, avec une erreur de mesure inférieure à 1 %, et constitue l'outil essentiel pour les tests Ms.

3.3 Étapes de test et flux d'opérations

Les tests magnétiques au cobalt doivent être effectués selon des procédures standardisées pour garantir des résultats précis et reproductibles.

Préparation des échantillons

Sélectionnez un échantillon de carbure (par exemple, une ébauche d'outil de 5 à 10 mm, cylindrique

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

ou cubique), nettoyez la surface, retirez l'huile et la couche d'oxyde (peut être essuyée à l'éthanol) pour éviter toute interférence avec la mesure magnétique. Pesez précisément la masse de l'échantillon ($\pm 0,01$ g) pour calculer l'intensité de magnétisation massique unitaire.

Test de saturation magnétique

Placer l'échantillon dans le champ magnétique intense (1,5-2 T) d'un analyseur magnétique pour magnétiser complètement la phase cobalt et enregistrer la teneur en cobalt ($\mu\text{Tm}^3/\text{kg}$). Calculer la teneur en cobalt selon la formule $M_s \div 16,1$ et la comparer à la valeur cible. Un écart supérieur ou égal à $\pm 0,5$ % indique la présence d'ingrédients anormaux ou défectueux.

Test de coercivité

À l'aide d'un coercivimètre, appliquez un champ magnétique inverse et mesurez H_c (kA/m) afin de réduire la magnétisation à zéro. Déterminez la granulométrie en fonction de la valeur H_c : > 20 kA/m correspond à une structure à grains fins, adaptée aux outils à haute dureté ; < 10 kA/m correspond à une structure à grains grossiers, adaptée aux moules à haute ténacité.

Analyse des données

Analyser les résultats de M_s et H_c . Si M_s est trop faible (< 90 % de la valeur attendue), il est possible que la phase cobalt ou η soit insuffisante. Si M_s est trop élevée (> 110 %), il est possible que du carbone libre soit présent. Une fluctuation anormale de H_c (> 10 %) indique un frittage irrégulier. Si nécessaire, une vérification supplémentaire peut être effectuée en combinant un microscope métallographique (grossissement 200x) ou une DRX (détection de la phase η $2\theta \approx 40^\circ$, du carbone libre $2\theta \approx 26^\circ$).

Enregistrement et traitement des résultats : enregistrer M_s , H_c et le numéro d'échantillon et les stocker dans la base de données qualité. Des résultats anormaux nécessitent un ajustement de la recette (par exemple, ajout de 0,1 à 0,2 % de carbone) ou une optimisation du frittage (ajustement de la température de ± 10 °C et prolongation du temps de maintien à 1,5 heure).

3.4 Normes et spécifications d'essai

Les essais magnétiques au cobalt doivent respecter les normes internationales et nationales afin de garantir la fiabilité des résultats. La norme ISO 3326:2013 spécifie la méthode de détermination de la saturation magnétique du cobalt en carbure cémenté, définissant clairement l'étalonnage de l'équipement (à l'aide d'étalons de cobalt pur), la taille de l'échantillon (5-10 mm) et les exigences de précision ($\pm 0,5$ %).

La norme ASTM B886 est une norme générale pour tester les propriétés magnétiques du carbure cémenté. Elle couvre les mesures de M_s et de H_c et met l'accent sur le contrôle de l'environnement d'essai (20-25 °C, sans interférence magnétique). La norme nationale chinoise GB/T 3849 exige en outre une répétabilité des essais (écart < 2 %) et un cycle d'étalonnage des équipements (une fois par mois) pour garantir la régularité de la production.

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

3.5 Précautions et contrôle des erreurs

Pour garantir la précision du test, les points suivants doivent être pris en compte : l'équipement doit être étalonné régulièrement, avec du cobalt pur ($M_s = 16,2 \mu\text{Tm}^3/\text{kg}$, $H_c = 5 \text{ kA/m}$) ou des échantillons standard, et l'erreur doit être contrôlée à $\pm 1 \%$. L'échantillon doit être uniforme, exempt de fissures ($< 5 \mu\text{m}$), de pores ($< 0,05 \%$) et l'écart de composition doit être inférieur à $0,1 \%$ en poids, faute de quoi il peut entraîner un écart de mesure. L'environnement de test doit être exempt de fortes interférences de champ magnétique ($< 0,1 \text{ mT}$), la température doit être maintenue entre 20 et $25 \text{ }^\circ\text{C}$ et l'humidité doit être inférieure à 60% . Si le résultat est anormal (écart $M_s > 5 \%$, fluctuation $H_c > 10 \%$), il est nécessaire de combiner une analyse chimique (telle que la mesure ICP de la teneur en cobalt, précision $\pm 0,05 \%$ en poids) ou une microscopie électronique à balayage (MEB) pour observer les défauts microscopiques (tels que les pores, la distribution de phase η) pour une vérification complète.

4. Méthodes d'optimisation et d'amélioration des tests magnétiques au cobalt

Afin d'améliorer encore la précision et la valeur applicative des essais magnétiques au cobalt, des améliorations peuvent être apportées à trois aspects : l'amélioration des équipements, l'optimisation des procédés et l'analyse des données. Les méthodes spécifiques sont les suivantes.

En termes d'amélioration des équipements, l'utilisation d'instruments de test de plus haute précision est essentielle pour améliorer les résultats des tests magnétiques du cobalt. Avec l'utilisation généralisée du carbure cémenté nanométrique (granulométrie $0,05\text{-}0,2 \mu\text{m}$), sa coercivité élevée ($H_c > 50 \text{ kA/m}$) et sa microstructure complexe ont imposé des exigences plus élevées en matière de précision des tests. La précision ($\pm 0,5 \%$) des analyseurs magnétiques traditionnels (tels que Koerzimat) ne répond plus aux besoins. Il est recommandé d'introduire un magnétomètre à échantillon vibrant de haute précision (VSM, précision $\pm 0,1 \mu\text{Tm}^3/\text{kg}$), capable de mesurer avec plus de précision la boucle d'hystérésis et les variations magnétiques microscopiques. Français De plus, le développement d'équipements d'essai magnétique du cobalt à haute température (prenant en charge les essais à $800\text{-}1000 \text{ }^\circ\text{C}$) peut évaluer les caractéristiques d'atténuation du magnétisme du cobalt dans des conditions de température élevée (M_s diminue de 5 à 10%), fournissant un support de prédiction des performances pour les outils à haute température (tels que les outils de traitement des moteurs d'aviation). Par exemple, à $1000 \text{ }^\circ\text{C}$, le M_s du carbure cémenté contenant 10% de cobalt est passé de $1,61$ à $1,45 \mu\text{Tm}^3/\text{kg}$, indiquant une oxydation à haute température ou une volatilisation du cobalt. Le revêtement (tel que TiAlN , épaisseur $2\text{-}3 \mu\text{m}$) doit être optimisé pour améliorer la résistance à la chaleur.

Français En termes d'optimisation du processus, les défauts tels que la phase η et le carbone libre peuvent être réduits en améliorant le processus de frittage et la conception de la formule, améliorant ainsi la stabilité des résultats des tests magnétiques au cobalt. La température de frittage doit être strictement contrôlée à $1350\text{-}1450 \text{ }^\circ\text{C}$. Une température trop élevée ($> 1500 \text{ }^\circ\text{C}$) entraînera des grains

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

grossiers (Hc chute de 20 kA/m à 8 kA/m), et une température trop basse ($< 1300^{\circ}\text{C}$) formera facilement une phase η (Ms chute à $< 90\%$ de la valeur attendue). Le processus de pressage isostatique à chaud (HIP, 150-200 MPa, 1350°C) peut réduire efficacement la porosité (de 0,1 % à 0,05 %), améliorer la valeur Ms (augmentation de 3 à 5 %) et la stabilité Hc (fluctuation $< 5\%$). Français De plus, l'ajout d'inhibiteurs de grains traces (tels que VC 0,2-0,5 % en poids ou Cr_3C_2 0,3-0,8 % en poids) peut contrôler la taille des grains de la phase cobalt (0,5-1 μm), augmenter Hc (de 15 kA/m à 20-25 kA/m) et réduire la formation de phase η (Ms est restauré à 98 % de la valeur attendue). En termes de conception de formulation, l'optimisation de la teneur en carbone ($6,0 \pm 0,2\%$ en poids) et de la teneur en cobalt (6-10 % en poids) peut éviter le carbone libre et la phase η , et l'écart Ms est contrôlé à $\pm 0,3\%$. Par exemple, après ajout de carbure cémenté contenant 8 % de cobalt par HIP et VC, Ms est stabilisé à 1,28-1,30 $\mu\text{Tm}^3/\text{kg}$ et la durée de vie de l'outil est augmentée de 20 % (de 3 heures à 3,6 heures).

En termes d'analyse de données, l'introduction de technologies d'analyse intelligente peut améliorer considérablement l'efficacité et la précision des essais magnétiques du cobalt. En 2025, l'intelligence artificielle (IA) et l'apprentissage automatique (ML) ont été largement utilisés dans l'analyse des données magnétiques du cobalt. En créant une base de données de performances Ms-Hc, l'IA peut prédire les types de défauts et les impacts sur les performances. Par exemple, si $\text{Ms} < 1,16 \mu\text{Tm}^3/\text{kg}$ (norme YG8 1,29 $\mu\text{Tm}^3/\text{kg}$), l'IA peut automatiquement signaler la possibilité d'une phase η (probabilité $> 80\%$) et recommander un ajustement de la teneur en carbone ($+ 0,1-0,2\%$ en poids) ou une recuisson (1350°C , 1,5 heure). De plus, le système de surveillance en temps réel (combiné à la spectroscopie infrarouge pour surveiller l'atmosphère de frittage) peut ajuster dynamiquement les paramètres de frittage afin de garantir la cohérence de Ms et Hc (écart $< 2\%$). L'analyse intelligente prend également en charge la prédiction des performances entre les conditions. Par exemple, dans un environnement chaud et humide (40°C , 90% d'humidité), la stabilité Ms des alliages Ni-Co (Ni 5-10%) est améliorée de 5 à 10%, ce qui convient aux applications d'ingénierie marine (durée de vie > 3 ans).

L'effet réel de la méthode d'amélioration globale est remarquable. Par exemple, un fabricant d'outils a optimisé l'essai magnétique au cobalt (analyse VSM+AI) pour contrôler l'écart Ms à $\pm 0,2\%$, la fluctuation Hc $< 3\%$ et le rapport de phase $\eta < 1\%$, et la dureté de l'outil (HRA 91-92) et sa durée de vie (coupe d'alliage de titane, 200 m/min) ont augmenté de 25 % (de 3 heures à 3,75 heures). Des améliorations similaires ont été apportées aux forets miniers (fréquence d'impact > 2000 fois/minute) pour prolonger la durée de vie de 30 % (de 200 heures à 260 heures), confirmant pleinement l'intérêt de l'optimisation de l'essai magnétique au cobalt.

5. Scénarios d'application des tests magnétiques au cobalt

Les tests magnétiques au cobalt présentent une valeur pratique considérable dans la production et les applications du carbure cémenté.

Contrôle de qualité

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

En vérifiant la teneur en cobalt et le bilan carbone, nous pouvons garantir que les performances du carbure sont conformes aux normes. Par exemple, le carbure YG6 (6 % de cobalt, $M_s = 0,97 \mu\text{Tm}^3/\text{kg}$, $H_c = 15-20 \text{ kA/m}$) présente une dureté HRA de 90-91 et une ténacité KIC de 10-12 $\text{MPa}\cdot\text{m}^{1/2}$, ce qui le rend adapté à la coupe générale.

Optimisation des processus

Guider l'ajustement du processus de frittage pour éviter les gros grains ($H_c < 8 \text{ kA/m}$) ou la formation de phase η ($M_s < 0,9 \mu\text{Tm}^3/\text{kg}$) et améliorer la cohérence du produit.

Détection des défauts

Identifier la phase η ou le carbone libre pour guider les ajustements de formulation (tels que l'ajout de 0,1 à 0,2 % de carbone) afin de réduire la perte de ténacité (KIC diminue de 15 %) ou la perte de dureté (HV diminue de 50 à 80).

Prédiction des performances

Un H_c élevé ($> 25 \text{ kA/m}$) convient aux outils à haute dureté (tels que les forets PCB, durée de vie > 4 heures) ; un H_c faible ($< 10 \text{ kA/m}$) convient aux moules à haute ténacité (tels que les forets miniers, durée de vie > 200 heures).

Exemples

Lors de la découpe d'alliage de titane aéronautique (200 m/min), l'outil contenant 10 % de cobalt a réussi le test magnétique au cobalt ($M_s = 1,61 \mu\text{Tm}^3/\text{kg}$, $H_c = 18 \text{ kA/m}$) pour garantir la dureté et la résistance aux chocs, et la durée de vie a atteint 3 à 4 heures, ce qui est mieux que l'outil non testé (durée de vie < 2 heures).

6. Support des données et derniers progrès

Benchmark de performance magnétique :

Cobalt pur : $M_s = 16,1-16,3 \mu\text{Tm}^3/\text{kg}$, $H_c = 5-6 \text{ kA/m}$, température de Curie 1145°C .

YG6 (6% cobalt) : $M_s = 0,97 \mu\text{Tm}^3/\text{kg}$, $H_c = 15-20 \text{ kA/m}$.

YG8 (8 % cobalt) : $M_s = 1,29 \mu\text{Tm}^3/\text{kg}$, $H_c = 10-15 \text{ kA/m}$.

Alliages nanométriques (0,05-0,2 μm) : $H_c = 50-60 \text{ kA/m}$, $M_s = 1,1-1,3 \mu\text{Tm}^3/\text{kg}$ (effet de joint de grain).

Impact du défaut :

Phase η : M_s diminue de 10 à 20 %, comme YG8 diminue de 1,29 à 1,0 $\mu\text{Tm}^3/\text{kg}$.

Carbone libre : M_s diminue de 5 à 10 %, comme YG6 qui diminue de 0,97 à 0,87 $\mu\text{Tm}^3/\text{kg}$.

Granulométrie 1-2 μm : $H_c = 10-15 \text{ kA/m}$, meilleure dureté-ténacité.

Progrès d'ici 2025 :

La production de carbure cémenté de qualité nanométrique a augmenté pour atteindre 20 % du total mondial, et la demande en H_c élevé ($> 50 \text{ kA/m}$) a favorisé la popularisation du VSM (précision $\pm 0,05 \mu\text{Tm}^3/\text{kg}$). La stabilité M_s des alliages Ni-Co (Ni 5-10 %) dans les environnements marins

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

(salinité 3,5 %, 50 MPa) a augmenté de 5 à 10 %, et la proportion d'application a atteint 15 %. L'analyse par IA a augmenté le taux de détection des défauts de 20 %, et les anomalies Ms ont déclenché automatiquement l'analyse SEM.

7. Conclusion

Dans le carbure cimenté, la propriété magnétique de la phase liante au cobalt est déterminante. Elle reflète la teneur en cobalt, le bilan carbone et la microstructure par l'intensité de saturation magnétique (Ms) et la coercivité (Hc). Elle constitue un outil essentiel pour le contrôle qualité et l'optimisation des performances. Les essais magnétiques au cobalt permettent non seulement de vérifier la composition et de détecter les défauts, mais aussi de guider l'optimisation du procédé et la prévision des performances, ce qui est essentiel pour améliorer la dureté, la ténacité et la résistance à l'usure du carbure cimenté. Grâce à l'introduction d'équipements de haute précision (tels que le VSM), à l'optimisation du frittage (HIP + inhibiteur de grains) et à l'analyse intelligente des données (IA + surveillance en temps réel), la précision et la valeur applicative des essais magnétiques au cobalt ont été considérablement améliorées, offrant un support technique solide pour les applications haute performance du carbure cimenté.

8. Références

- ScienceDirect (2020). Propriétés magnétiques des métaux durs. ScienceDirect (2020).
ISO 3326:2013. Détermination de la saturation magnétique des métaux durs. ISO 3326 : 2013.
ASTM B886. Méthode d'essai standard pour les propriétés magnétiques des métaux durs.
GB/T 3849. Méthodes d'essai magnétique pour les métaux durs (Chine).
ITIA (2025). Rapport annuel sur les métaux durs nanostructurés. ITIA (2025).

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

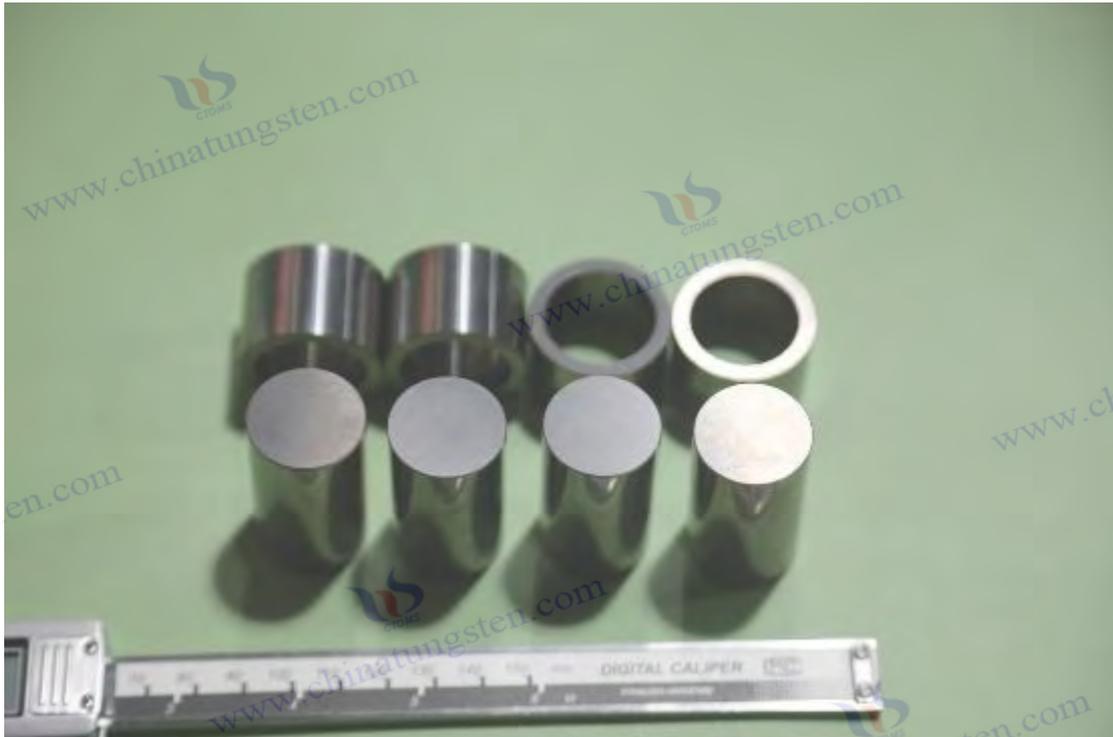
WeChat : Follow "China Tungsten Online"



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



Annexe :

ISO 3326:2013 Méthode de détermination de la saturation magnétique du cobalt dans le carbure cémenté

ISO 3326:2013 Métaux durs —

Détermination de la saturation mécanique du carbone Publié : juillet 2013

Statut : Actuellement en vigueur Champ d'application : Cette norme spécifie la méthode de détermination de l'intensité de saturation magnétique du cobalt (Co) dans le carbure cémenté. Elle s'applique au carbure cémenté contenant au moins 3 % (fraction massique) de liant ferromagnétique (principalement du cobalt) pour le contrôle qualité et l'analyse de la composition.

1. Portée

Cette norme décrit une méthode non destructive pour déterminer la saturation magnétique (Ms) du cobalt dans les carbures cémentés afin d'évaluer la teneur en cobalt, le bilan carbone et la qualité de l'alliage.

Alliages WCCo) contenant des liants ferromagnétiques (tels que le cobalt et le nickel, avec une fraction massique ≥ 3 %), mais ne convenant pas aux alliages non magnétiques ou faiblement magnétiques.

Les résultats des tests sont utilisés pour :

Vérifiez que la teneur en cobalt est conforme aux spécifications.

Détecte les déséquilibres de teneur en carbone (tels que la phase ϵ ou le carbone libre).

Evaluation de la qualité du processus de frittage (par exemple présence d'inclusions non magnétiques).

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

2. Références normatives

Il n'existe pas de références directes à d'autres normes, mais il est recommandé de se référer aux normes d'essai du carbure cémenté pertinentes, telles que :

ISO 4499 (Détermination de la microstructure des carbures cémentés).

ISO 3738 (Méthodes d'échantillonnage des carbures cémentés).

Il est très pertinent pour le contenu de la norme ASTM B886 (test de saturation magnétique du carbure cémenté) et peut être utilisé comme référence supplémentaire.

3. Termes et définitions

Métal dur : Matériau composite constitué d'une phase dure (comme le carbure de tungstène WC) et d'une phase de liaison (comme le cobalt).

Saturation magnétique (Ms) : Intensité à laquelle l'aimantation de la phase cobalt atteint sa valeur maximale sous un champ magnétique fort, avec l'unité $\mu\text{Tm}^3/\text{kg}$ ou $\text{kA}\cdot\text{m}^2/\text{kg}$.

Liant ferromagnétique : Cobalt, nickel et autres phases métalliques avec ferromagnétisme, le cobalt étant le plus courant.

Phase η (phase Eta) : carbures cassants (tels que $\text{Co}_3\text{W}_3\text{C}$) formés lorsqu'il n'y a pas assez de carbone, ce qui réduit le magnétisme et la ténacité.

Carbone libre : Carbone non magnétique qui précipite lorsqu'il y a un excès de carbone, affaiblissant la résistance de l'alliage.

4. Principe

Le magnétisme du carbure cémenté provient de la phase liante de cobalt, et la phase dure (comme le WC) ne contribue pas au magnétisme.

Sous des champs magnétiques puissants (généralement $> 1,5\text{ T}$), la phase cobalt atteint une saturation magnétique, et Ms est proportionnelle à la teneur en cobalt. La constante de saturation magnétique du cobalt pur est de $16,116,3\ \mu\text{Tm}^3/\text{kg}$ (ScienceDirect, 2020).

La mesure Ms peut :

Calculer la teneur en cobalt : $\text{Ms} \div 16,1\ \mu\text{Tm}^3/\text{kg} \approx$ Fraction massique de cobalt.

Détection d'impuretés non magnétiques : la phase η ou les oxydes réduisent Ms (1020%), le carbone libre réduit Ms (510%).

Le test est non destructif et indépendant de la forme et de la taille de l'échantillon (dans certaines limites).

5. Appareil

Analyseur magnétique : tel que Koerzimat MS ou Sigmameter, équipé d'un générateur de champ magnétique puissant (1,52 T) et d'un système de détection de flux magnétique.

Échantillon standard d'étalonnage : échantillon de cobalt pur ou de carbure cémenté avec une teneur en cobalt connue, valeur Ms traçable à l'unité SI.

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

Balance de précision : précision $\pm 0,01$ g, utilisée pour peser la masse de l'échantillon.

Dispositif à température constante : La température de l'environnement de test est contrôlée à 2025°C pour éviter les effets thermiques.

Équipement de démagnétisation (en option) : garantit que l'échantillon ne présente aucune magnétisation résiduelle.

6. Échantillon d'essai

Forme et taille : L'échantillon peut avoir n'importe quelle forme (comme un cylindre, un cube, une ébauche d'outil), la taille est généralement de 510 mm et la masse est de 0,550 g.

Exigences de surface : propre, exempte d'huile, de couche d'oxyde ou de dommages mécaniques.

Homogénéité : La composition interne de l'échantillon est uniforme, sans fissures ni pores évidents.

Quantité : Au moins 3 échantillons par lot, échantillonnage représentatif selon la norme ISO 3738.

7. Étapes du test (Procédure)

Étalonnage de l'équipement :

en utilisant des étalons de cobalt pur ($M_s = 16,1 \mu\text{Tm}^3 / \text{kg}$) ou des échantillons de carbure certifiés. L'erreur d'étalonnage est contrôlée à $\pm 1\%$ et les données d'étalonnage sont enregistrées.

Préparation des échantillons :

Nettoyez la surface de l'échantillon pour éliminer l'huile, la saleté et les oxydes.

Pesez la masse de l'échantillon (m, unité : g) à l'aide d'une balance de précision avec une précision de $\pm 0,01$ g.

Si l'échantillon présente une magnétisation résiduelle, utilisez un équipement de démagnétisation.

Mesure de saturation magnétique :

Placez l'échantillon dans un champ magnétique puissant (1,52 T) d'un analyseur magnétique pour vous assurer que la phase cobalt est entièrement magnétisée.

Mesurer le flux magnétique et enregistrer l'intensité de saturation magnétique (M_s , en $\mu\text{Tm}^3 / \text{kg}$).

La mesure a été répétée trois fois et la valeur moyenne a été relevée. L'écart d'une mesure unique était inférieur à $\pm 0,5\%$.

Enregistrements de données :

Enregistrez le numéro de l'échantillon, la masse, la valeur M_s et les conditions de test (température, intensité du champ magnétique).

Si M_s est anormal, vérifiez l'échantillon ou l'équipement et refaites le test si nécessaire.

8. Calcul et expression des résultats

teneur en cobalt :

$$\text{钴质量分数 (\%)} = \frac{M_s}{M_{s_{\text{cobalt}}}} \times 100$$

Parmi elles, la valeur mesurée est M_s , le cobalt pur M_s étant de $16,1 \mu\text{Tm}^3/\text{kg}$. Par exemple, $M_s = 1,61 \mu\text{Tm}^3/\text{kg}$, la teneur en cobalt étant d'environ 10 %.

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

Saturation magnétique relative (S) :

$$S = \frac{Ms_{\text{测值}}}{Ms_{\text{理论}}}$$

La théorie MS est la valeur de saturation magnétique (basée sur la teneur en cobalt) d'une phase hypothétique de liant de cobalt pur. $S < 0,9$ indique la phase η et $S > 1,1$ indique le carbone libre.

Précision : Le résultat est conservé à 3 décimales près (par exemple $1,610 \mu\text{Tm}^3/\text{kg}$), et la teneur en cobalt est conservée à 1 décimale près (par exemple 10,0%).

9. Analyse des résultats des tests

Plage normale : La valeur de saturation magnétique du cobalt après frittage est généralement de 85 à 95 % de la valeur théorique (car une partie du cobalt se dissout dans le WC ou forme une phase non magnétique).

Situation anormale :

Ms est faible (<90%) : phase η (Co₃W₃C), oxyde ou teneur insuffisante en cobalt peut exister.

Ms est trop élevé (>110%) : Il peut y avoir une teneur excessive en carbone libre ou en cobalt.

Vérification supplémentaire : Les résultats anormaux doivent être combinés avec une analyse métallographique (observation au microscope de la phase η , carbone libre) ou une analyse chimique (mesure ICP de la teneur en cobalt).

10. Rapport d'essai

Le rapport doit inclure les éléments suivants :

Référence normative : ISO 3326:2013.

Informations sur l'échantillon : numéro, forme, qualité, lot.

Conditions de test : modèle d'appareil, intensité du champ magnétique (T), température ambiante (°C).

Résultats : Valeur Ms ($\mu\text{Tm}^3/\text{kg}$), teneur en cobalt calculée (%), saturation magnétique relative (S).

Informations d'étalonnage : valeur Ms de l'échantillon standard, date d'étalonnage.

Description de l'exception : S'il y a un écart, décrivez la cause possible (comme la phase η).

Testeur : Nom, date, signature.

Informations sur le laboratoire : nom, adresse, qualifications de certification.

11. Précautions

Étalonnage de l'équipement : Étalonnage régulier, erreur $\leq \pm 1\%$, à l'aide d'échantillons standards traçables.

Uniformité de l'échantillon : Évitez les fissures, les pores ou la composition inégale qui affectent la précision de l'échantillon.

Contrôle environnemental : L'environnement de test n'a pas d'interférence de champ magnétique forte et la température est de 20±2°C.

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

Sécurité : Respecter les procédures d'utilisation de l'équipement pour éviter l'impact de champs magnétiques puissants sur le personnel ou l'équipement électronique.

Vérification des données : les valeurs Ms anormales doivent être testées à plusieurs reprises et confirmées en combinaison avec une analyse métallographique ou XRD.

12. Annexes

Annexe A (informative) : Relation entre la saturation magnétique du cobalt et la teneur en carbone. Une gamme Ms d'alliages WCCo typiques est fournie (par exemple YG6 : $M_s \approx 0,97 \mu Tm^3/kg$, YG8 : $M_s \approx 1,29 \mu Tm^3/kg$).

Le graphique montre l'effet de la phase η et du carbone libre sur Ms (la phase η diminue de 1020 %, le carbone libre diminue de 510 %).

Annexe B (informative) : Guide d'étalonnage de l'équipement.

Fréquence d'étalonnage recommandée (mensuelle ou tous les 1000 tests), exigences d'échantillons standard.

Annexe C (informative) : Analyse des sources d'erreur.

Inhomogénéité de l'échantillon, équipement non étalonné, interférence du champ magnétique environnemental, etc.

13. Liens vers les normes connexes

ASTM B886 : Méthode similaire pour déterminer la saturation magnétique du carbure cimenté, mettant l'accent sur la non-destructivité et l'évaluation indirecte de la teneur en carbone (ASTM B886, 2024).

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

Annexe :

Méthode d'essai de saturation magnétique du carbure cimenté : ASTM B88624

1. Introduction

Le carbure cimenté (tel que l'alliage carbure de tungstène-cobalt, WCCo) est largement utilisé dans des domaines industriels tels que les outils de coupe, les moules et les forets en raison de sa dureté élevée, de sa résistance à l'usure et de sa ténacité. **La force de saturation magnétique (Ms)** est un indicateur clé pour évaluer la teneur et la qualité des phases de liaison ferromagnétiques (telles que le cobalt et le nickel) dans le carbure cimenté. La norme ASTM B88624 spécifie la méthode de détermination de la Ms des poudres de carbure cimenté et des produits frittés à l'aide d'un testeur de saturation magnétique, adapté au contrôle qualité non destructif, à l'évaluation indirecte de la teneur en carbone et à l'acceptation des produits. Cet article présente en détail le contenu de la norme ASTM B88624, notamment son champ d'application, ses principes, son équipement, ses procédures, ses calculs et ses exigences en matière de rapports, afin de fournir une référence aux praticiens.

2. Portée de la norme

Cette norme décrit une méthode d'essai non destructif permettant de déterminer l'intensité de saturation magnétique (Ms) des poudres de carbure cimenté et des produits frittés afin d'évaluer la fraction magnétique des phases de liaison ferromagnétiques (telles que le cobalt, le nickel et le fer).

Les objets concernés sont :

Poudre de carbure cimenté avant frittage.

Produits frittés tels que couteaux, moules, forets.

Objectif du test :

Évaluation indirecte de la teneur en carbone, détection de la phase η (Co₃W₃C) ou du carbone libre.

Vérifiez le contenu de la phase liante pour vous assurer que les spécifications sont respectées.

Évaluer la qualité des produits en poudre et frittés pour l'acceptation du produit.

La norme est basée sur les unités SI ($\mu\text{Tm}^3 / \text{kg}$) et complétée par des unités pouces-livres.

3. Termes et définitions

Carbure cimenté : Matériau composite composé d'une phase dure (comme le carbure de tungstène WC, le carbure de titane TiC) et d'une phase de liaison ferromagnétique (comme le cobalt, le nickel).

Intensité de saturation magnétique (Ms) : Intensité à laquelle l'aimantation de la phase de liaison atteint sa valeur maximale sous un champ magnétique fort, avec l'unité $\mu\text{Tm}^3 / \text{kg}$, reflétant la teneur en cobalt ou en nickel.

Phase liante ferromagnétique : le cobalt (Co), le nickel (Ni) ou le fer (Fe), apporte magnétisme et ténacité, le cobalt étant le plus courant.

Phase η : carbure non magnétique (tel que Co₃W₃C) formé lorsque le carbone est insuffisant, ce qui réduit Ms et la ténacité.

Carbone libre : carbone non magnétique précipité lorsque le carbone est excessif, réduisant Ms et la résistance.

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

Constante de saturation magnétique : le cobalt pur M_s est de $16,116,3 \mu\text{Tm}^3/\text{kg}$, le nickel est de $5,4 \mu\text{Tm}^3/\text{kg}$.

4. Importance et utilisation

Non destructif : Pas besoin de détruire l'échantillon, adapté aux produits en poudre et frittés.

Évaluation de la teneur en carbone : M_s reflète le bilan carbone, la phase η ou le carbone libre diminue M_s .

Contrôle qualité : vérification de la teneur en cobalt/nickel, détection de défauts de frittage (ex : oxydes).

Acceptation du produit : Assurez-vous que le produit répond aux spécifications de qualité (telles que YG6, YG8).

Limitations : Applicable uniquement aux carbures cémentés contenant une phase liante ferromagnétique, non applicable aux alliages non magnétiques.

5. Principe du test

Le magnétisme du carbure cémenté provient de la phase liante ferromagnétique (comme le cobalt), tandis que la phase dure (comme le WC) n'y contribue pas. Sous un champ magnétique intense ($1,52 \text{ T}$), la phase liante atteint sa saturation magnétique, et M_s est proportionnelle à sa teneur. La formule de calcul de la teneur en cobalt est la suivante : $M_s \div 16,1 \mu\text{Tm}^3/\text{kg} \approx$ fraction massique de cobalt. Par exemple, $M_s = 1,61 \mu\text{Tm}^3/\text{kg}$ signifie que la teneur en cobalt est d'environ 10 %. Les impuretés non magnétiques (comme la phase η , le carbone libre, les oxydes) réduisent M_s , et des valeurs anormales indiquent des problèmes de qualité.

6. Équipement d'essai

Testeur de saturation magnétique : tel que Koerzimat MS, Sigmameter, équipé d'un générateur de champ magnétique puissant ($1,52 \text{ T}$) et d'un système de détection de flux magnétique (précision $\pm 0,5\%$).

Balance de précision : précision $\pm 0,01 \text{ g}$, mesure la masse de l'échantillon.

Échantillon standard d'étalonnage : cobalt pur ($M_s = 16,1 \mu\text{Tm}^3 / \text{kg}$) ou carbure cémenté avec M_s connu.

Appareil à température constante : température de l'environnement de test 2025°C .

Équipement de démagnétisation (en option) : élimine la magnétisation résiduelle des échantillons.

7. Exigences relatives à l'échantillon

Type : Poudre avant frittage ou produit fritté (tel que outils, moules).

Forme et taille : Toute forme (comme un cylindre, un cube), taille 510 mm , masse $0,550 \text{ g}$.

Surface : Propre, exempte d'huile, de couche d'oxyde ou de dommages mécaniques.

Uniformité : La composition interne est uniforme, sans fissures ni pores.

Échantillonnage : Au moins 3 échantillons représentatifs par lot.

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

8. Étapes de test

Étalonnage de l'équipement :

Calibré à l'aide d'échantillons de cobalt pur ou de carbure certifié, erreur $M_s \leq \pm 1\%$.

Enregistrer les données d'étalonnage (échantillon standard M_s , date).

Préparation des échantillons :

Nettoyez l'échantillon pour éliminer l'huile, la saleté et les oxydes.

Peser la masse (en g, $\pm 0,01$ g).

S'il y a une magnétisation résiduelle, utilisez un équipement de démagnétisation.

Mesure de saturation magnétique :

L'échantillon a été placé dans un champ magnétique puissant (1,52 T) pour garantir que la phase cobalt était entièrement magnétisée.

Mesurer le flux magnétique et enregistrer M_s ($\mu\text{Tm}^3 / \text{kg}$).

La mesure a été répétée trois fois et la valeur moyenne a été relevée. L'écart unique était inférieur à $\pm 0,5\%$.

Enregistrements de données :

Enregistrez le numéro de l'échantillon, la masse, la valeur M_s et les conditions de test (intensité du champ magnétique, température).

Si M_s est anormal, vérifiez l'échantillon ou l'équipement et refaites le test si nécessaire.

9. Calcul et expression

Intensité de saturation magnétique :

$$M_s = \frac{\text{磁通量}}{\text{样品质量}}$$

L'unité est $\mu\text{Tm}^3/\text{kg}$, avec 3 décimales (par exemple 1,610 $\mu\text{Tm}^3/\text{kg}$).

Teneur en cobalt :

$$\text{钴质量分数 (\%)} = \frac{M_s}{16.1} \times 100$$

Conservez 1 décimale (par exemple 10,0 %).

Saturation magnétique relative (S) :

$$S = \frac{M_{s\text{测量}}}{M_{s\text{理论}}}$$

La théorie de M_s est basée sur la teneur en cobalt, $S < 0,9$ indique la phase η et $S > 1,1$ indique le carbone libre.

Précision : Erreur de répétabilité $< \pm 1\%$, écart entre lots $< \pm 2\%$.

10. Analyse des résultats

Plage normale : Le M_s de l'alliage fritté est de 85 à 95 % de la valeur théorique (car une partie du

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

cobalt se dissout dans le WC ou forme une phase non magnétique).

Situation anormale :

Ms est faible (<90%) : phase η insuffisante, teneur en oxyde et en cobalt.

Ms est trop élevé (>110%) : la teneur en carbone libre et en cobalt dépasse la norme.

Vérification supplémentaire : Les Ms anormales doivent être combinées à une analyse métallographique (observation au microscope de la phase η , carbone libre), à une diffraction des rayons X ou à une analyse chimique (mesure ICP de la teneur en cobalt).

11. Rapport d'essai

Le rapport comprend :

Référence normative : ASTM B88624.

Informations sur l'échantillon : numéro, type (poudre/fritté), forme, masse, lot.

Conditions de test : modèle d'appareil, intensité du champ magnétique, température.

Résultats : Valeur Ms, teneur en cobalt, saturation magnétique relative.

Informations d'étalonnage : valeur Ms de l'échantillon standard, date d'étalonnage.

Description de l'exception : Motif de l'écart (par exemple phase η , carbone libre).

Testeur : Nom, date, signature.

Informations sur le laboratoire : nom, adresse, qualifications de certification.

12. Précision et biais

Répétabilité : Avec le même équipement et le même opérateur, l'écart de 3 mesures est $\leq \pm 0,5\%$.

Reproductibilité : L'écart entre les lots est $\leq \pm 2\%$ dans différents laboratoires et équipements.

Écart : aucun écart systématique, valeurs Ms traçables aux unités SI.

Facteurs d'influence : échantillons irréguliers, équipement non étalonné et interférence du champ magnétique environnemental.

13. Notes

Étalonnage de l'équipement : Mensuel ou tous les 1000 tests, en utilisant du cobalt pur ou des échantillons certifiés.

Homogénéité de l'échantillon : éviter les fissures, les pores ou la composition inégale.

Contrôle environnemental : pas d'interférence de champ magnétique fort, température 2025°C.

Sécurité : Respecter les procédures d'utilisation de l'équipement et éviter l'influence de champs magnétiques puissants.

Vérification des données : Répéter les tests des résultats anormaux, combinés à une analyse métallographique ou chimique.

14. Annexe

Annexe A : Relation entre la saturation magnétique et la teneur en carbone.

Alliages typiques : YG6 (6 % cobalt, $Ms \approx 0,97 \mu Tm^3/kg$), YG8 (8 % cobalt, $Ms \approx 1,29 \mu Tm^3/kg$).

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

Réduction de phase η Ms 1020%, carbone libre réduit de 510%.

Annexe B : Guide d'étalonnage de l'équipement.

Fréquence d'étalonnage, exigences d'échantillons standard, contrôle des erreurs.

Annexe C : Sources d'erreurs et contrôles.

Préparation des échantillons, stabilité de l'équipement, interférences environnementales.

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



Annexe :

GB/T 38492015 Détermination de la valeur de saturation magnétique du cobalt dans le carbure cémenté

Date de publication : 10 décembre 2015

Date de mise en œuvre : 1er juillet 2016

Statut : Actuellement en vigueur

Champ d'application : Cette norme spécifie la méthode de détermination de la saturation magnétique du cobalt dans le carbure cémenté. Elle s'applique au carbure cémenté contenant un liant ferromagnétique (principalement du cobalt, fraction massique $\geq 3\%$) et est utilisée pour le contrôle qualité, la vérification de la teneur en cobalt et l'évaluation du bilan carbone.

1. Portée

Cette norme décrit une méthode non destructive pour déterminer **la valeur de saturation magnétique** (M_s) du cobalt dans les carbures cémentés dans le but d'évaluer la teneur en cobalt, le bilan carbone et la qualité de l'alliage.

Applicable à :

Produits en carbure fritté (tels que outils, moules, forets).

Poudre de carbure cémenté avant frittage (selon les capacités de l'équipement).

Objectif du test :

Vérifiez que la teneur en cobalt répond aux spécifications (par exemple YG6, YG8).

Evaluation indirecte de la teneur en carbone, détection de la phase η ($\text{Co}_3\text{W}_3\text{C}$) ou du carbone libre.

Évaluer la qualité du processus de frittage et identifier les impuretés non magnétiques telles que les oxydes.

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

Unité : Les unités SI sont utilisées. La valeur de saturation magnétique est exprimée en $\mu\text{Tm}^3/\text{kg}$ ou $\text{kA}\cdot\text{m}^2/\text{kg}$.

2. Références normatives

GB/T 3848 : Méthode d'analyse chimique du carbure cimenté (utilisée pour compléter la vérification de la teneur en cobalt).

GB/T 4198 : Méthodes d'échantillonnage et de préparation d'échantillons pour le carbure cimenté.

ISO 3326:2013 : Méthode de détermination de la saturation magnétique du cobalt dans le carbure cimenté (Cette norme est cohérente avec l'ISO 3326 dans son contenu technique et la traduction est équivalente).

ASTM B886 : Méthode de détermination de la saturation magnétique du carbure cimenté (norme de référence, méthode similaire).

3. Termes et définitions

Carbure cimenté : Matériau composite composé d'une phase dure (comme le carbure de tungstène WC, le carbure de titane TiC) et d'une phase de liaison ferromagnétique (comme le cobalt, le nickel).

Saturation magnétique du cobalt (M_s) : Valeur de l'intensité d'aimantation maximale de la phase liante du cobalt sous un champ magnétique fort, unité : $\mu\text{Tm}^3 / \text{kg}$, reflétant la teneur et la pureté du cobalt.

Phase de liaison ferromagnétique : métaux ferromagnétiques tels que le cobalt (Co) et le nickel (Ni), avec le cobalt comme agent de liaison principal.

Phase η (phase Eta) : carbures non magnétiques (tels que $\text{Co}_3\text{W}_3\text{C}$) formés lorsque le carbone est insuffisant, réduisant le magnétisme et la ténacité.

Carbone libre : Carbone non magnétique qui précipite lorsqu'il y a un excès de carbone, affaiblissant la résistance.

Constante de saturation magnétique : le cobalt pur M_s est de $16,116,3 \mu\text{Tm}^3/\text{kg}$ (ScienceDirect, 2020).

4. Principe

Le magnétisme du carbure cimenté provient de la phase liante de cobalt, et la phase dure (comme le WC) ne contribue pas au magnétisme.

Sous des champs magnétiques intenses (typiquement 1,52 T), la phase cobalt atteint sa saturation magnétique et M_s est proportionnelle à la teneur en cobalt. La constante M_s du cobalt pur est de $16,1 \mu\text{Tm}^3/\text{kg}$ (valeur typique).

Teneur en cobalt : $M_s \div 16,1 \mu\text{Tm}^3 / \text{kg} \approx$ Fraction massique de cobalt. Par exemple, $M_s = 1,61 \mu\text{Tm}^3 / \text{kg}$ signifie que la teneur en cobalt est d'environ 10 %.

Influence des impuretés non magnétiques :

La phase η ou les oxydes réduisent M_s de 1020 %, indiquant une insuffisance de carbone.

Réduction du carbone libre M_s 510 %, indiquant un excès de carbone.

Le test est non destructif et indépendant de la forme et de la taille de l'échantillon (dans les limites

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

de l'équipement).

5. Appareil

Analyseur magnétique : tel que Koerzimat MS, Sigmameter, ou équipement domestique (tel qu'un testeur de saturation magnétique d'une usine d'instruments chinoise), équipé de :

Générateur de champ magnétique puissant (1,52 T, pour assurer la saturation de la phase cobalt).

Système de détection de flux magnétique (précision $\pm 0,5\%$).

Balance de précision : précision $\pm 0,01$ g, mesure la masse de l'échantillon.

Étalon d'étalonnage : échantillons de cobalt pur ($M_s = 16,1 \mu Tm^3 / kg$) ou de carbure cimenté avec M_s connu, traçables aux unités SI.

Dispositif à température constante : La température de l'environnement de test est contrôlée à $2025^\circ C$ pour éviter les effets thermiques.

Équipement de démagnétisation (en option) : élimine la magnétisation résiduelle des échantillons.

6. Échantillon d'essai

Type : Produits en carbure fritté (préférés), ou poudre avant frittage (selon les capacités de l'équipement).

Forme et taille : Toute forme (comme cylindre, cube, ébauche d'outil), taille 510 mm, masse 0,550 g.

Exigences de surface : propre, exempte d'huile, de couche d'oxyde ou de dommages mécaniques.

Homogénéité : La composition interne est uniforme, sans fissures ni pores évidents.

Échantillonnage : Selon GB/T 4198, au moins 3 échantillons représentatifs par lot.

7. Étapes du test (Procédure)

Étalonnage de l'équipement :

L'instrument est étalonné à l'aide d'échantillons de cobalt pur ou de carbure certifié, et l'erreur M_s est contrôlée à $\pm 1\%$.

Enregistrez les données d'étalonnage (valeur M_s de l'échantillon standard, date d'étalonnage).

Préparation des échantillons :

Nettoyez la surface de l'échantillon pour éliminer l'huile, la saleté et les oxydes.

Peser la masse de l'échantillon à l'aide d'une balance de précision (m, unité : g, précision : $\pm 0,01$ g).

Si l'échantillon présente une magnétisation résiduelle, utilisez un équipement de démagnétisation.

Mesure de saturation magnétique :

Placez l'échantillon dans un champ magnétique puissant (1,52 T) d'un analyseur magnétique pour vous assurer que la phase cobalt est entièrement magnétisée.

Mesurer le flux magnétique et enregistrer M_s (en $\mu Tm^3/kg$).

La mesure a été répétée trois fois et la valeur moyenne a été relevée. L'écart d'une mesure unique était inférieur à $\pm 0,5\%$.

Enregistrements de données :

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

Enregistrez le numéro de l'échantillon, la masse, la valeur Ms et les conditions de test (température, intensité du champ magnétique).

Si Ms est anormal, vérifiez l'échantillon ou l'équipement et refaites le test si nécessaire.

8. Calcul et expression des résultats

Valeur de saturation magnétique :

$$M_s = \frac{\text{磁通量}}{\text{样品质量}}$$

L'unité est $\mu\text{Tm}^3/\text{kg}$, avec 3 décimales (par exemple $1,610 \mu\text{Tm}^3/\text{kg}$).

Teneur en cobalt :

$$\text{钴质量分数 (\%)} = \frac{M_s}{16.1} \times 100$$

Conservez 1 décimale (par exemple 10,0 %).

Saturation magnétique relative (S) :

$$S = \frac{M_{s\text{测量}}}{M_{s\text{理论}}}$$

La théorie de Ms est basée sur la teneur en cobalt, $S < 0,9$ indique la phase η et $S > 1,1$ indique le carbone libre.

Précision : Précision des résultats $\pm 1 \%$, variation d'un lot à l'autre $< \pm 2 \%$.

9. Analyse des résultats

Plage normale : La Ms de l'alliage fritté est généralement de 85 à 95 % de la valeur théorique (car une partie du cobalt se dissout dans le WC ou forme une phase non magnétique).

Situation anormale :

Ms est faible ($< 90\%$) : une phase η , une teneur en oxyde ou en cobalt insuffisante peuvent exister.

Ms est trop élevé ($> 110\%$) : Il peut y avoir une teneur excessive en carbone libre ou en cobalt.

Vérification supplémentaire : Les résultats anormaux doivent être combinés avec une analyse métallographique (observation au microscope de la phase η , carbone libre), une diffraction des rayons X (DRX) ou une analyse chimique (mesure de la teneur en cobalt selon GB/T 3848).

10. Rapport d'essai

Le rapport doit inclure :

Référence standard : GB/T 38492015.

Informations sur l'échantillon : numéro, type (poudre/fritté), forme, masse, lot.

Conditions de test : modèle d'appareil, intensité du champ magnétique (T), température ambiante ($^{\circ}\text{C}$).

Résultats : Valeur Ms ($\mu\text{Tm}^3/\text{kg}$), teneur en cobalt (%), saturation magnétique relative (S).

Informations d'étalonnage : valeur Ms de l'échantillon standard, date d'étalonnage.

Description des exceptions : S'il y a des écarts, décrivez les causes possibles (par exemple phase η , carbone libre).

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

Testeur : Nom, date, signature.

Informations sur le laboratoire : nom, adresse, accréditation (le cas échéant).

11. Précision et biais

Répétabilité : Avec le même équipement et le même opérateur, l'écart de 3 mesures est $\leq \pm 0,5\%$.

Reproductibilité : L'écart entre les lots est $\leq \pm 2\%$ dans différents laboratoires et équipements.

Biais : aucun biais systématique, les valeurs Ms sont traçables aux unités SI, l'étalonnage garantit la précision.

Facteurs d'influence : échantillons irréguliers, équipement non étalonné et interférence du champ magnétique environnemental.

12. Précautions

Étalonnage de l'équipement : Mensuel ou tous les 1000 tests, en utilisant du cobalt pur ou des échantillons certifiés.

Uniformité de l'échantillon : Évitez les fissures, les pores ou la composition inégale qui affectent la précision de l'échantillon.

Contrôle environnemental : L'environnement de test n'a pas d'interférence de champ magnétique forte et la température est de 2025°C.

Sécurité : Respecter les procédures d'utilisation des équipements pour éviter l'impact de champs magnétiques puissants sur le personnel ou les équipements électroniques.

Vérification des données : Ms anormale La valeur doit être répétée et confirmée par analyse métallographique ou chimique.

13. Annexes

Annexe A (informative) : Relation entre la saturation magnétique du cobalt et la teneur en carbone. Gamme typique de Ms des alliages : YG6 (6 % de cobalt, $M_s \approx 0,97 \mu Tm^3/kg$), YG8 (8 % de cobalt, $M_s \approx 1,29 \mu Tm^3/kg$).

Réduction de phase η Ms 1020%, carbone libre réduit de 510%.

Annexe B (informative) : Guide d'étalonnage des équipements.

Fréquence d'étalonnage (mensuelle ou tous les 1000 tests), exigences d'échantillons standard.

Annexe C (à titre informatif uniquement) : Analyse des sources d'erreur.

Inhomogénéité de l'échantillon, équipement non étalonné, interférence du champ magnétique environnemental, etc.

14. Liens vers les normes connexes

ISO 3326:2013 : Détermination de la saturation magnétique du cobalt dans le carbure cémenté. La norme GB/T 3849 lui est équivalente et présente le même contenu technique.

ASTM B88624 : Méthode de détermination de la saturation magnétique du carbure cémenté,

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

approche similaire, couvre à la fois les poudres et les produits frittés.

GB/T 3848 : Méthodes d'analyse chimique du carbure cémenté, vérification supplémentaire de la teneur en cobalt.

GB/T 3850 : La méthode de détermination de la coercivité du carbure cémenté, combinée à un test magnétique au cobalt, peut évaluer de manière exhaustive la microstructure.

GB/T 3850 : Méthode de détermination de la coercivité du carbure cimenté

1 Portée

Cette norme spécifie la méthode de détermination de la coercivité (H_c) des matériaux et produits en carbure cimenté. Cette méthode s'applique aux carbures cimentés à base de carbure de tungstène (tels que les alliages WC-Co, nuances typiques : YG6, YG8, etc.) avec du cobalt (Co) comme phase liante. La mesure de la coercivité permet de caractériser indirectement la granulométrie, la distribution de la teneur en cobalt et l'intégrité microstructurale du carbure cimenté. Cette méthode peut être utilisée pour le contrôle qualité en production, la réception des produits et les essais non destructifs en recherche et développement.

Cette norme ne s'applique pas aux carbures cimentés sans cobalt (tels que les carbures cimentés à base de nickel ou de fer) ni aux matériaux non magnétiques.

2 Références normatives

Les documents suivants sont essentiels à l'application de la présente norme. Pour tout document référencé daté, seule la version datée s'applique. Pour tout document référencé non daté, la dernière version (y compris tous les amendements) s'applique.

GB/T 3848 Détermination de la teneur en cobalt dans le carbure cimenté

GB/T 3849 Méthode d'essai des propriétés magnétiques du carbure cimenté

GB/T 223.1 Méthodes d'analyse chimique de l'acier et des alliages

GB/T 230.1 Essai de dureté Rockwell pour matériaux métalliques Partie 1 : Méthode d'essai

ISO 3326:2013 Méthode de détermination de la coercivité du carbure cimenté

Norme ASTM B887 pour la détermination de la coercivité du carbure cimenté

3 Termes et définitions

Les termes et définitions suivants s'appliquent à cette norme.

3.1 Force coercitive (H_c)

Dans le carbure cimenté, l'intensité du champ magnétique inverse nécessaire pour réduire l'intensité de magnétisation de la phase de liant au cobalt de l'état de saturation à zéro, l'unité est kA/m (kiloampère/mètre).

3.2 Saturation magnétique (M_s)

Sous l'action d'un champ magnétique externe (généralement $> 1,5$ T), la phase cobalt atteint l'état d'intensité d'aimantation maximale, avec l'unité de $\mu Tm^3 / kg$ (moment magnétique par kilogramme de matériau).

3.3 Le métal dur est un matériau composite composé de carbure de tungstène (WC)

comme phase dure et de cobalt (Co) comme phase de liaison grâce au procédé de métallurgie des

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

poudres.

3.4 Taille des grains La taille moyenne des

particules de carbure de tungstène dans le carbure cémenté, exprimée en micromètres (μm), affecte la valeur de la force coercitive.

3,5 (phase Êta)

est une phase cassante formée dans le carbure cémenté en raison d'une teneur insuffisante en carbone. Sa formule chimique est $\text{Co}_3\text{W}_3\text{C}$, ce qui réduit les propriétés magnétiques et la ténacité.

3.6 Carbone libre :

Carbone précipité en raison d'une teneur excessive en carbone dans le carbure cémenté, affectant les propriétés magnétiques et la dureté.

4 Principe

La coercivité du carbure cémenté provient du ferromagnétisme de la phase liante cobalt (température de Curie d'environ $1145\text{ }^\circ\text{C}$, intensité de magnétisation de $1,7$ à $1,75\ \mu\text{B}/\text{atome}$), tandis que la phase dure (comme le WC) est un matériau non magnétique et ne contribue pas au magnétisme. Le principe de base du test de coercivité est le suivant : tout d'abord, la phase cobalt est entièrement magnétisée jusqu'à saturation sous l'action d'un champ magnétique externe intense ($1,5$ à $2\ \text{T}$), puis un champ magnétique inverse progressivement croissant est appliqué pour mesurer l'intensité du champ magnétique qui fait chuter l'intensité de magnétisation à zéro, c'est-à-dire la coercivité (H_c). La coercivité est inversement proportionnelle à la taille des grains de la phase cobalt. La H_c du carbure cémenté à grains fins (grains de $0,2$ à $0,5\ \mu\text{m}$) est généralement de 25 à $40\ \text{kA/m}$, et celle du carbure cémenté à grains grossiers (grains $> 5\ \mu\text{m}$) de 5 à $10\ \text{kA/m}$. De plus, la coercivité est également affectée par la teneur en cobalt, l'uniformité microstructurale et les défauts (tels que la phase η ou les pores), qui peuvent être utilisés pour évaluer la microstructure et la qualité du procédé du carbure cémenté.

5. Instruments et équipements

5.1 Coercivimètre

Un coercivimètre à aimant permanent ou électromagnétique peut fournir un champ magnétique puissant de $1,5$ à $2\ \text{T}$, avec une précision de mesure de $\pm 1\ \text{kA/m}$ et une répétabilité de $< 2\ \%$.

5.2 Un analyseur magnétique

tel que le Koerzimat 1.097 ou le Sigmameter 2.068 peut mesurer simultanément la coercivité et l'intensité de saturation magnétique avec une précision de $\pm 0,5\ \%$.

5.3 Le magnétomètre à échantillon vibrant (VSM)

est utilisé pour des mesures de haute précision avec une erreur de $\pm 0,1\ \text{kA/m}$ et convient à la

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

recherche en laboratoire.

5.4 Balance

avec une précision de $\pm 0,01$ g, utilisée pour peser la masse de l'échantillon.

5.5 Les outils de nettoyage

comprennent de l'éthanol et des pinces non magnétiques pour nettoyer la surface de l'échantillon.

5.6 La température de l'environnement de test est contrôlée **dans une boîte à température constante**

à 20-25°C et l'humidité est <60%.

5.7 Un microscope métallographique

avec un grossissement de 200x à 500x est utilisé pour vérifier la taille des grains et la microstructure.

5.8 Le diffractomètre à rayons X (DRX)

est utilisé pour détecter la phase η ($2\theta \approx 40^\circ$) ou le carbone libre ($2\theta \approx 26^\circ$).

6. Échantillons

6.1 Exigences relatives à l'échantillon

Forme : L'échantillon est cylindrique ou cubique, avec une taille de 5 à 10 mm (diamètre ou longueur de côté).

Etat de surface : La surface doit être plane, exempte de fissures (longueur < 5 μm), de pores (porosité < 0,05 %) ou de couche d'oxyde, et nettoyée à l'éthanol si nécessaire.

Homogénéité : écart de composition < 0,1 % en poids, fluctuation de la granulométrie < 5 %, évitant les défauts internes affectant la mesure.

Quantité : Chaque lot doit comporter au moins 3 échantillons, et les échantillons doivent provenir du même processus de frittage.

6.2 Préparation des échantillons

Découper les éprouvettes à partir d'ébauches en carbure ou de produits finis (par exemple outils, matrices) pour éviter l'introduction de contraintes lors de la coupe (contrainte < 100 MPa).

S'il y a une couche d'oxyde ou d'huile sur la surface de l'échantillon, essuyez-le avec de l'éthanol et séchez-le.

Pesez l'échantillon (précision $\pm 0,01$ g) et enregistrez le numéro de l'échantillon.

7 Méthodes d'essai

7.1 Conditions d'essai

Température ambiante : 20-25°C, fluctuation de température $< \pm 2^\circ\text{C}$, pour éviter d'affecter les propriétés magnétiques de la phase cobalt.

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

Humidité ambiante : < 60 %, pour éviter que l'humidité ne provoque une microcorrosion de la phase cobalt (l'intensité de magnétisation diminue de < 2 %).

Interférence de champ magnétique : Il n'y a pas d'interférence de champ magnétique forte dans la zone de test (< 0,1 mT).

7.2 Étalonnage de l'instrument

en utilisant des échantillons standards (par exemple cobalt pur, $H_c = 5 \text{ kA/m}$, $M_s = 16,2 \mu\text{Tm}^3 / \text{kg}$) avec une erreur de $\leq \pm 1\%$.

Cycle d'étalonnage : une fois par mois, ou avant chaque test.

Vérifiez l'intensité du champ magnétique (1,5 à 2 T) pour vous assurer que la phase cobalt est entièrement magnétisable.

7.3 Étapes de test

Placez l'échantillon dans la zone de test du coercivimètre et fixez-le avec une pince non magnétique pour vous assurer que l'échantillon ne bouge pas.

Appliquez un champ magnétique puissant (1,5 à 2 T) pour magnétiser complètement la phase cobalt jusqu'à saturation et la maintenir pendant 5 à 10 secondes.

Appliquez progressivement un champ magnétique inverse et enregistrez l'intensité du champ magnétique lorsque l'intensité de magnétisation tombe à zéro, c'est-à-dire la force coercitive (H_c), en kA/m.

Chaque échantillon a été mesuré 3 fois et la valeur moyenne a été prise avec un écart de < 2%.

Enregistrez le numéro de l'échantillon, la masse, la valeur H_c et les conditions de test (température, humidité, modèle d'instrument).

7.4 Traitement des données

La moyenne des trois valeurs mesurées pour chaque échantillon a été calculée comme valeur H_c finale.

Si la valeur H_c du même lot d'échantillons fluctue de > 10 % (par exemple, YG8 passe de 15 kA/m à 25 kA/m), cela indique un frittage inégal et des tests supplémentaires sont nécessaires.

basé sur la formule empirique $H_c \approx k/d$ (k est une constante, d est la taille des grains). Par exemple, $H_c = 30 \text{ kA/m}$ correspond à une taille de grain d'environ 0,2-0,5 μm .

8 Expression des résultats

La valeur de la force coercitive est en kA/m, avec une décimale (par exemple 15,2 kA/m).

Le rapport d'essai doit inclure :

a) le numéro de l'échantillon ; b) la valeur de coercitivité (H_c) ; c) les conditions d'essai (température, humidité) ; d) le modèle de l'instrument et l'état d'étalonnage ; e) si la valeur H_c s'écarte de la valeur cible de $> \pm 5\%$ (par exemple, cible YG6 18 kA/m, mesurée < 17,1 ou > 18,9 kA/m), les raisons possibles doivent être expliquées (par exemple, anomalies de phase η ou de grain).

9 Précision et biais

9.1 Précision

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

La valeur Hc d'une mesure répétée du même échantillon par le même opérateur et le même équipement dans un court laps de temps est inférieure à 2 %.

Reproductibilité : L'écart des valeurs Hc mesurées par différents laboratoires, différents opérateurs et différents équipements est < 5 %.

9.2 Biais

Erreur d'étalonnage de l'instrument : ± 1 kA/m.

Inhomogénéité de l'échantillon : L'inhomogénéité de la composition ou de la granulométrie entraîne une fluctuation de Hc de 5 à 10 %.

Interférence environnementale : les champs magnétiques puissants ($> 0,1$ mT) provoquent des écarts Hc > 2 %.

10 facteurs d'influence

10.1 Taille des grains

Plus la taille des grains est petite, plus la coercivité est élevée. Le carbure cémenté à grains fins (taille des grains $0,2 \mu\text{m}$) Hc est de 30 à 40 kA/m, et le carbure cémenté à grains grossiers (taille des grains $5 \mu\text{m}$) Hc est de 5 à 10 kA/m.

10.2 Teneur en cobalt

L'augmentation de la teneur en cobalt (de 6% à 15%) rend la magnétisation de la phase cobalt plus facile à inverser, et Hc diminue légèrement (10-15%).

10.3 La formation de la phase d'équilibre du carbone

η ($\text{Co}_3\text{W}_3\text{C}$) entraîne une diminution de Hc de 5 à 10 % (par exemple, YG8 diminue de 15 kA/m à 13 kA/m), et l'influence du carbone libre (C) est < 2 %.

10.4 Processus de frittage

Une température élevée (> 1500 °C) entraîne un grossissement des grains et une diminution de Hc de 20 kA/m à 8 kA/m.

Le pressage isostatique à chaud (HIP, 150 MPa, 1350°C) améliore l'homogénéité microstructurale et Hc augmente de 5 à 10 %.

10.5 Une porosité défectueuse

$> 0,1$ % ou une contrainte résiduelle (> 100 MPa) entraîne une fluctuation de Hc de 10 à 15 %, et la densité doit être optimisée ($> 99,5$ %).

10.6 Facteurs environnementaux

Une température élevée (800°C) réduit Hc de 5 à 8 % (par exemple, YG10 passe de 18 kA/m à 16 kA/m).

La chaleur humide (40°C , 90% d'humidité) affecte $< 2\%$.

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

11 Application des résultats des tests

11.1 Classification des performances

Hc > 25 kA/m : convient aux outils à haute dureté (tels que les forets PCB, HRA > 92, durée de vie > 4 heures).

Hc < 10 kA/m : adapté aux moules à haute ténacité (tels que les forets miniers, KIC > 15 MPa·m^{1/2}, durée de vie > 200 heures).

11.2 Optimisation du procédé Une valeur anormale

de Hc (fluctuation > 10 %) indique des grains grossiers ou un frittage irrégulier. La température de frittage (1 350-1 450 °C) peut être ajustée ou des inhibiteurs de grains (tels que VC 0,2-0,5 % en poids) peuvent être ajoutés.

11.3 Détection des défauts Une diminution de 5 à 10 %

de Hc (par exemple YG8 de 15 kA/m à 13 kA/m) peut être due à la phase η, et la teneur en carbone doit être ajustée (cible 6,0 ± 0,2 % en poids).

11.4 Exemples d'application

Lors de la découpe d'acier aéronautique (vitesse de coupe 250 m/min), un outil contenant 10 % de Co a réussi le test Hc (18 kA/m), garantissant une dureté HRA 90 et une résistance aux chocs, et la durée de vie de l'outil a atteint 3,5 heures.

12 notes

12.1 Étalonnage de l'instrument

Avant le test, étalonnez l'instrument avec une erreur de ≤ ±1% pour éviter un écart systématique.

12.2 Homogénéité des échantillons

Les échantillons doivent être exempts de fissures (< 5 μm), de pores (< 0,05 %), d'écart de composition < 0,1 % en poids et de fluctuation de la taille des grains < 5 %.

12.3 Contrôle environnemental

La zone de test n'a pas de champ magnétique puissant (< 0,1 mT), la température est de 20 à 25 °C et l'humidité est < 60 %.

12.4 Vérification complète

Si la valeur Hc est anormale (écart > 5 %), observez les limites des grains avec un microscope métallographique (grossissement 500x) ou utilisez l'ICP pour mesurer la teneur en cobalt (précision ± 0,05 % en poids).

13 Rapport de test

Le rapport de test doit inclure les éléments suivants :

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

Numéro de norme : GB/T 3850 ;
Description de l'échantillon : marque, lot, taille ;
Conditions de test : température, humidité, interférences de champ magnétique ;
Informations sur l'instrument : modèle, état d'étalonnage ;
Résultats des tests : valeur de coercivité (Hc , kA/m), analyse des écarts ;
Description anormale : Si l'écart de la valeur Hc est > 5 %, expliquez la cause possible ;
Date du test : par exemple le 21 mai 2025 ;
Testeur : Signature.

14 Annexe (Annexe informative)

Annexe A Valeurs de coercivité typiques

Tableau A.1 Valeurs de coercivité des nuances courantes de carbure cémenté

Marque	Teneur en cobalt (% en poids)	Taille des grains (μm)	Force coercitive (kA/m)
YG6	6	1-2	15-20
YG8	8	2-3	10-15
YG10	10	2-4	8-12
Nano-alliage	8	0,05-0,2	50-60

Annexe B Analyse des erreurs

B.1 Erreur de l'instrument

± 1 kA/m .

B.2 Hétérogénéité de l'échantillon

Une composition ou une granulométrie hétérogène entraîne une fluctuation de Hc de 5 à 10 %.

B.3 Interférence environnementale

Un champ magnétique puissant ($> 0,1$ mT) provoque une déviation Hc > 2 %.

Annexe C Suggestions d'amélioration

C.1 Utiliser un magnétomètre à échantillon vibrant (VSM) de haute précision avec une erreur de $\pm 0,1$ kA/m.

C.2 Utiliser l'intelligence artificielle (IA) pour analyser les données Hc et prédire la taille des grains et les défauts avec une précision de > 90 %. C.3 Introduire un équipement d'essai de coercivité à haute température (prenant en charge les essais à 800-1000 °C) pour évaluer les performances à haute température. C.4 Combiner la spectroscopie infrarouge pour surveiller l'atmosphère de frittage, ajuster dynamiquement les paramètres de frittage et réduire les fluctuations de Hc (< 2 %).

Annexe D Exemples de données de test

Tableau D.1 Données d'essai de coercivité du carbure cémenté YG8

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

Numéro d'échantillon	Masse (g)	Valeur de mesure Hc (kA/m)	Hc moyen (kA/m)	déviations (%)
YG8-001	5.02	14,8, 15,0, 14,9	14,9	1.3
YG8-002	5.05	15.1, 15.3, 15.0	15.1	1.9
YG8-003	4,98	14,7, 14,9, 14,8	14,8	1.3

Annexe E Données sur l'impact environnemental

Modifications de la valeur Hc dans différentes conditions environnementales

Conditions environnementales	Hc (kA/m)	changement (%)
Standard (25°C, 50% d'humidité)	15.0	-
Haute température (800°C)	13,8	-8.0
Chaleur humide (40°C, 90% d'humidité)	14,7	-2.0

GB/T 3848 Détermination de la teneur en cobalt dans le carbure cimenté

1 Portée

Cette norme spécifie la méthode de détermination de la teneur en cobalt (Co) du carbure cimenté. Cette méthode s'applique aux matériaux et produits en carbure cimenté (tels que les nuances YG6, YG8, etc.) dont la phase dure est le carbure de tungstène (WC) et la phase liante le cobalt. Le pourcentage massique (% en poids) de cobalt est déterminé par analyse chimique ou instrumentale. Cette méthode peut être utilisée pour le contrôle qualité en production, l'acceptation des produits et l'analyse des composants en recherche et développement.

Cette norme ne s'applique pas aux carbures cimentés sans cobalt (tels que les carbures cimentés à base de nickel ou de fer) ou aux matériaux contenant d'autres éléments interférents importants.

2 Références normatives

Les documents suivants sont essentiels à l'application de la présente norme. Pour tout document référencé daté, seule la version datée s'applique. Pour tout document référencé non daté, la dernière version (y compris tous les amendements) s'applique.

GB/T 3849 Méthode d'essai des propriétés magnétiques du carbure cimenté

GB/T 223.1 Méthodes d'analyse chimique de l'acier et des alliages

GB/T 6682 Spécifications et méthodes d'essai pour l'eau utilisée dans les laboratoires d'analyse

ISO 3909:1976 Détermination de la teneur en cobalt des carbures cimentés - Méthode potentiométrique

Méthode d'essai standard ASTM E1019 - Analyse de la composition chimique des alliages

3 Termes et définitions

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

Les termes et définitions suivants s'appliquent à cette norme.

3.1 Teneur en cobalt :

Le pourcentage pondéral (% en poids) de cobalt dans le carbure cémenté, basé sur la masse totale, reflète la proportion de la phase liante.

3.2 Le métal dur est un matériau composite composé de carbure de tungstène (WC)

comme phase dure et de cobalt (Co) comme phase de liaison grâce au procédé de métallurgie des poudres.

La phase η 3.3 (phase Êta)

est une phase fragile formée dans le carbure cémenté en raison d'une teneur insuffisante en carbone. Sa formule chimique est $\text{Co}_3\text{W}_3\text{C}$, ce qui peut interférer avec la détermination de la teneur en cobalt.

3.4 Carbone libre Le

carbone précipité à partir du carbure cémenté en raison d'une teneur excessive en carbone peut affecter les résultats de l'analyse.

3.5 Le titrage potentiométrique est

une méthode de titrage qui utilise des électrodes pour mesurer le changement de potentiel de la solution afin de déterminer le point final.

4 Principe

Le principe de détermination de la teneur en cobalt du carbure cémenté repose sur la décomposition chimique et l'analyse quantitative. L'échantillon est décomposé par un acide ou une fusion pour convertir le cobalt en un composé soluble (tel que le chlorure de cobalt), puis sa teneur est déterminée par méthode gravimétrique, titrage potentiométrique ou analyse spectroscopique. La méthode de titrage potentiométrique utilise le complexe stable formé par le cobalt et l'EDTA (acide éthylènediaminetétraacétique) pour déterminer le point final par variation de potentiel ; la méthode d'analyse spectroscopique (comme la spectroscopie d'absorption atomique ou la spectroscopie d'émission par plasma inductif) repose sur le spectre d'absorption ou d'émission caractéristique du cobalt pour la quantification. La phase η ou le carbone libre peuvent interférer avec la détermination et doivent être éliminés par prétraitement.

5. Instruments et équipements

5.1 Balance analytique

avec une précision de $\pm 0,0001$ g, utilisée pour peser des échantillons et des réactifs.

5.2 Titrateur potentiométrique

équipé d'une électrode en verre et d'une électrode de référence, avec une précision de $\pm 0,1$ mV, adapté au titrage potentiométrique.

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

5.3 Un spectromètre d'absorption atomique (AAS)

d'une longueur d'onde de 240,7 nm et d'une limite de détection de 0,01 µg/mL a été utilisé pour la détermination de la teneur en cobalt.

5.4 La limite de détection du spectromètre d'émission optique à plasma à couplage inductif (ICP-OES)

est de 0,001 µg/mL, ce qui convient à l'analyse multi-éléments.

5.5 La plage de contrôle de la température du bain-marie à température constante est de 20 à 100 °C, avec une précision de ± 1 °C.

5.6 Une plaque chauffante ou un four électrique

avec une plage de température de 100 à 600 °C est utilisé pour la décomposition de l'échantillon.

5.7 Les unités de distillation acide

sont utilisées pour éliminer les éléments interférents (tels que l'arsenic et l'antimoine).

5.8 Les capacités des pipettes et des fioles jaugées

sont de 5 mL, 10 mL, 25 mL et 100 mL, avec une précision de ± 0,1 mL.

6 réactifs

6.1 Acide nitrique (HNO₃) de

haute pureté, concentration 65%-68%.

6.2 Acide chlorhydrique (HCl)

de haute pureté, concentration 36%-38%.

6.3 L'acide sulfurique (H₂SO₄) est

d'une grande pureté, avec une concentration de 95 à 98 %.

6.4 La concentration de la solution standard EDTA

est de 0,01 mol/L, à utiliser après l'étalonnage.

Solution tampon 6,5

pH 5,0-6,0, contenant de l'acétate d'ammonium et de l'ammoniac.

6.6 Des indicateurs

tels que l'orange de xylénol sont utilisés pour déterminer le point final du titrage.

6.7 L'eau déionisée

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

est conforme à la norme GB/T 6682 Grade 1 sur l'eau.

7 spécimens

7.1 Exigences relatives à l'échantillon

Forme : L'échantillon est une poudre, des granules ou de petits morceaux d'une masse de 0,2 à 0,5 g.

Homogénéité : écart de composition < 0,1 % en poids, fluctuation de la granulométrie < 5 %.

Etat de surface : Pas de couche d'huile ou d'oxyde, nettoyer à l'éthanol si nécessaire.

7.2 Préparation des échantillons

Prélevez un échantillon représentatif de l'ébauche en carbure cimenté ou du produit fini et broyez-le jusqu'à obtenir une granulométrie < 0,1 mm.

Après avoir été conservé dans un dessiccateur à température constante (105°C, 1 h), l'échantillon a été refroidi à température ambiante et pesé ($\pm 0,0001$ g).

Prélevez 3 à 5 échantillons parallèles de chaque lot pour garantir des résultats représentatifs.

8 Méthodes d'essai

8.1 Titrage potentiométrique

8.1.1 Décomposition de l'échantillon

Pesez 0,2 g d'échantillon et placez-le dans un bécher de 250 mL.

Ajoutez 10 ml d'acide nitrique et 5 ml d'acide sulfurique, chauffez jusqu'à ce que le mélange soit presque sec et laissez refroidir.

Ajouter 20 mL d'acide chlorhydrique, chauffer pour dissoudre le résidu, puis refroidir et diluer à 100 mL.

8.1.2 Étapes de titrage

Prélever 10 mL de la solution, ajouter la solution tampon (pH 5,5) et l'indicateur de lutéoline.

Titre avec une solution standard EDTA à 0,01 mol/L et enregistrez le changement potentiel jusqu'au point final.

Formule de calcul :

$$\text{铜含量 (wt\%)} = \frac{C \times V \times M \times 58.93 \times 100}{m \times 1000}$$

8.1.3 Test à blanc

Effectuez un test à blanc selon les mêmes étapes et déduisez la valeur à blanc.

8.2 Spectroscopie d'absorption atomique (AAS)

8.2.1 Décomposition de l'échantillon

Pesez 0,1 g d'échantillon, ajoutez 5 mL d'acide nitrique et 2 mL d'acide chlorhydrique et chauffez

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

pour dissoudre.

Après refroidissement, le volume a été ajusté à 50 mL et filtré à travers une membrane filtrante de 0,45 µm.

8.2.2 Étapes de mesure

Réglez la longueur d'onde de l'instrument à 240,7 nm et démarrez l'opération.

La concentration en cobalt a été déterminée à l'aide d'une méthode de série standard dans la plage de 0,1 à 10 µg/mL.

Formule de calcul :

$$\text{钴含量 (wt\%)} = \frac{C \times V \times 100}{m \times 1000}$$

8.2.3 Élimination des interférences

S'il y a une interférence du fer ou du nickel, ajoutez un agent anti-interférence (comme le sel de lanthane).

8.3 Spectroscopie d'émission optique à plasma à couplage inductif (ICP-OES)

8.3.1 Décomposition de l'échantillon

Peser 0,1 g d'échantillon, ajouter 5 mL d'acide nitrique et 1 mL de peroxyde d'hydrogène et digérer au micro-ondes.

Après refroidissement, diluer à 50 mL et filtrer pour une utilisation ultérieure.

8.3.2 Étapes de mesure

Réglez la longueur d'onde sur 228,616 nm et calibrez l'instrument.

La concentration en cobalt a été déterminée par la méthode de la courbe standard avec une limite de détection de 0,001 µg/mL.

La formule de calcul est la même que 8.2.2.

8.3.3 Élimination des interférences

S'il y a une interférence de tungstène, ajustez les paramètres de correction d'arrière-plan.

9 Expression des résultats

la teneur en cobalt est exprimée en % en poids avec 2 décimales (par exemple 6,25 %).

Le rapport d'essai doit inclure :

- Numéro de norme : GB/T 3848 ;
- Description de l'échantillon : marque, lot, qualité ;
- Méthode d'essai : titrage potentiométrique, AAS ou ICP-OES ;
- Résultat : teneur en cobalt et écart ;
- Conditions d'essai : température, humidité ;
- Modèle d'instrument et état d'étalonnage ;
- Date d'essai : par exemple le 21 mai 2025 ;
- Testeur : signature.

10 Précision et biais

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

10.1 Précision

Répétabilité : L'écart de teneur en cobalt mesuré par le même opérateur, le même équipement et dans un court laps de temps est $< 0,2 \%$.

Reproductibilité : L'écart de teneur en cobalt mesuré par différents laboratoires et différents opérateurs est $< 0,5 \%$.

10.2 Biais

Erreur de l'instrument : AAS $\pm 0,01 \mu\text{g/mL}$, ICP-OES $\pm 0,001 \mu\text{g/mL}$.

Inhomogénéité de l'échantillon : un écart de composition $> 0,1 \%$ en poids entraîne une fluctuation des résultats de $0,3$ à $0,5 \%$.

Éléments interférents : Le biais peut atteindre 1 à 2% lorsque la phase η ou le carbone libre n'est pas éliminé.

11 facteurs d'influence

11.1 Une décomposition incomplète de l'échantillon (par exemple, résidu de tungstène) peut entraîner une sous-estimation de la teneur en cobalt de $0,5$ à 1% .

11.2 Éléments interférents

Le fer ($> 5 \%$) et le nickel ($> 2 \%$) peuvent interférer avec la détermination de l'AAS et nécessiter une pré-séparation.

11.3 Concentration acide

trop élevée L'acidité ($\text{pH} < 2$) entraîne un décalage du point final de titrage EDTA de $0,1$ à $0,3 \%$.

11.4 Conditions environnementales

Une température élevée ($> 40 \text{ }^\circ\text{C}$) ou une humidité élevée ($> 70 \%$) provoque l'évaporation de la solution, avec un écart de $< 0,2 \%$.

12 Application des résultats des tests

12.1 Contrôle de qualité

Vérifiez que la teneur en cobalt répond aux exigences de conception, telles que la cible YG6 de $6 \pm 0,2 \%$.

12.2 Optimisation du processus

Une faible teneur en cobalt indique des ingrédients insuffisants, tandis qu'une teneur élevée en cobalt indique un excès de phase liante.

12.3 Prédiction des propriétés

Une teneur en cobalt de 6 à 10% correspond à une dureté élevée (HRA 90-92), 10 à 15% correspond

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

à une ténacité élevée (KIC 12-15 MPa·m^{1/2}).

12.4 Exemple

Dans la production d'outils de coupe, l'YG8 avec une teneur en cobalt de 8,1 % assure une dureté de HRA 91 et une durée de vie de > 3 heures.

13 notes

13.1 L'instrument doit être étalonné

à l'aide d'un échantillon de cobalt standard avec une erreur de <±0,1 %.

13.2 Homogénéité des échantillons

Assurez-vous que les échantillons sont exempts de fissures, de pores et ont une composition uniforme.

13.3 La température de la salle d'essai est contrôlée à 20-25°C et l'humidité est <60%.

13.4 Protection de sécurité

Portez des lunettes de protection pendant le fonctionnement pour éviter les éclaboussures d'acide.

14 Annexe (Annexe informative)

Annexe A Valeurs typiques de la teneur en cobalt

Tableau A.1 Teneur en cobalt des nuances courantes de carbure cimenté

Marque	Teneur en cobalt (% en poids)	Dureté (HRA)	Ténacité (KIC, MPa·m ^{1/2})
YG6	6,0 ± 0,2	90-91	10-12
YG8	8,0 ± 0,2	89-90	12-14
YG10	10,0 ± 0,3	88-89	14-16

Annexe B Analyse des erreurs

B.1 Erreur de l'instrument :

AAS ±0,01 µg/mL, ICP-OES ±0,001 µg/mL.

B.2 Erreur opérationnelle

L'écart du jugement du point final de titrage est de 0,1 à 0,2 %.

B.3 Influence environnementale

Une humidité > 70 % entraîne un écart de 0,2 % dans le résultat.

Annexe C Suggestions d'amélioration

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

C.1 Utiliser la digestion par micro-ondes pour améliorer l'efficacité de la décomposition et réduire les résidus de tungstène.

C.2 Utiliser l'ICP-MS pour améliorer la sensibilité de détection, avec une limite de détection de < 0,0001 µg/mL. C.3 Introduire un système de titrage automatisé pour réduire les erreurs humaines.

Annexe D Exemples de données de test

Tableau D.1 Données d'essai sur la teneur en cobalt du carbure cémenté YG8

Numéro d'échantillon	Masse (g)	Teneur en cobalt (% en poids)	Valeur moyenne (% en poids)	déviations(%)
YG8-001	0,201	8.05, 8.10	8.08	0,37
YG8-002	0,203	8h00, 8h03	8.02	0,25
YG8-003	0,202	8.12, 8.09	8.11	0,37

Annexe E Impact des éléments d'interférence

Tableau E.1 Effets de différents éléments interférents sur la détermination de la teneur en cobalt

干扰元素	含量 (wt%)	偏差 (wt%)	消除方法
铁	5	0.5	加入硼盐
镍	2	0.3	预分离
铝	10	1.0	微波消解

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



ISO 3909:1976

Détermination de la teneur en cobalt dans le carbure cimenté - méthode potentiométrique 1 Portée

La présente norme internationale spécifie une méthode de détermination de la teneur en cobalt (Co) du carbure cimenté par méthode potentiométrique. Cette méthode s'applique aux mélanges de carbure et de poudres métalliques de liaison sans lubrifiant, au carbure cimenté préfritté ou fritté de toutes nuances, dont la teneur en cobalt est supérieure à 1 % (fraction massique, m/m). Cette méthode peut être utilisée pour le contrôle qualité lors de la production de carbure cimenté, l'acceptation des produits et l'analyse de la composition en recherche et développement.

Cette norme ne s'applique pas aux carbures cimentés dont la teneur en cobalt est inférieure à 1 %, ni aux matériaux contenant des éléments interférents importants (tels qu'une teneur élevée en fer et en nickel).

2 Références normatives

Les documents suivants sont essentiels à l'application de la présente norme. Pour tout document référencé daté, seule la version datée s'applique. Pour tout document référencé non daté, la dernière version (y compris tous les amendements) s'applique.

ISO 5725 Méthodes d'essai de précision (exactitude et fidélité) et évaluation des résultats

ISO 11873 Carbure cimenté - Terminologie

3 Termes et définitions

Les termes et définitions suivants s'appliquent à cette norme.

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

3.1 Teneur en cobalt :

Le pourcentage pondéral de cobalt dans le carbure cémenté (m/m), basé sur la masse totale, reflète la proportion de la phase de liaison.

3.2 Le métal dur est un matériau composite composé de carbure de tungstène (WC)

comme phase dure et de cobalt (Co) comme phase de liaison grâce au procédé de métallurgie des poudres.

3.3 (phase Êta)

est une phase fragile formée dans le carbure cémenté en raison d'une teneur insuffisante en carbone. Sa formule chimique est Co_3W_3C , ce qui peut interférer avec la détermination de la teneur en cobalt.

3.4 Carbone libre :

Le carbone précipité à partir du carbure cémenté en raison d'une teneur excessive en carbone peut affecter les résultats de l'analyse.

3.5 Le titrage potentiométrique est

une méthode permettant de déterminer le point final du titrage en mesurant le changement de potentiel de la solution.

4 Principe

Cette méthode dissout le cobalt de l'échantillon de carbure cémenté en un composé soluble (tel que le chlorure de cobalt) par décomposition acide, puis détermine la teneur en cobalt par titrage potentiométrique. Après décomposition acide de l'échantillon, les ions cobalt (Co^{2+}) présents dans la solution forment un complexe stable avec l'acide éthylènediaminetétraacétique (EDTA), et le point final est déterminé par titrage potentiométrique. Ce dernier utilise des électrodes (généralement des électrodes en verre et des électrodes de référence) pour surveiller la variation soudaine du potentiel de la solution et déterminer le point final. La phase η ou le carbone libre peuvent interférer avec la détermination et doivent être éliminés par prétraitement (distillation acide ou filtration, par exemple).

5 éléments d'interférence

5.1 Fer (Fe)

Lorsque la teneur en fer est $> 5\%$ (m/m), il peut former un complexe avec l'EDTA, interférant avec le titrage du cobalt et doit être éliminé par pré-séparation (comme l'échange d'ions).

5.2 Nickel (Ni)

Lorsque la teneur en nickel est $> 2\%$ (m/m), elle peut affecter le point final du titrage potentiométrique et doit être éliminée par pré-séparation ou ajout d'un agent masquant (tel que l'eau ammoniacale).

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

5.3 Tungstène (W)

Le tungstène peut former des précipités (tels que l'acide tungstique) qui interfèrent avec la clarification de la solution et doivent être éliminés par dissolution et filtration complètes.

5.4 La phase η et

la phase η de carbone libre peuvent conduire à une sous-estimation de la teneur en cobalt, et le carbone libre peut adsorber les ions cobalt et doit être traité par pré-frittage ou distillation acide.

6 réactifs

6.1 Acide nitrique (HNO_3)

de qualité analytique, concentration 65%-68%.

6.2 Acide chlorhydrique (HCl)

de qualité analytique, concentration 36%-38%.

6.3 Acide sulfurique (H_2SO_4) de

qualité analytique, concentration 95%-98%.

6.4 La concentration de la solution standard d'EDTA

est de 0,01 mol/L et elle doit être étalonnée avec une solution standard de zinc avant utilisation.

6.5 Solution tampon

pH 5,0-6,0, contenant de l'acétate d'ammonium et de l'ammoniac.

6.6 Indicateur (auxiliaire)

Xylenol Orange, utilisé pour observer le point final de titrage (facultatif).

6.7 Résistivité de l'eau déionisée $\geq 18 \text{ M}\Omega \cdot \text{cm}$.

7 Instruments et équipements

7.1 Une balance analytique

d'une précision de $\pm 0,0001 \text{ g}$ est utilisée pour peser les échantillons et les réactifs.

7.2 Le titrateur potentiométrique

est équipé d'une électrode en verre et d'une électrode de référence (telle qu'une électrode Ag/AgCl) avec une précision de $\pm 0,1 \text{ mV}$.

7.3 Une plaque chauffante ou un four électrique

avec une plage de température de 100 à 600 °C est utilisé pour la décomposition de l'échantillon.

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

7.4 La plage de contrôle de la température **du bain-marie à température constante** est de 20 à 100 °C, avec une précision de ± 1 °C.

7.5 L'appareil de distillation acide

est utilisé pour éliminer les éléments interférents (tels que l'arsenic et l'antimoine).

7.6 Les capacités des pipettes et des fioles jaugées

sont de 5 mL, 10 mL, 25 mL et 100 mL, avec une précision de $\pm 0,1$ mL.

7.7 Dispositif de filtration

avec membrane filtrante de 0,45 μm pour la filtration de la solution.

8. Échantillons

8.1 Exigences relatives à l'échantillon

Forme : L'échantillon est une poudre, des granulés ou de petits morceaux d'une masse de 0,2 à 0,5 g.

Homogénéité : écart de composition $< 0,1$ % (m/m), fluctuation de la granulométrie < 5 %.

Etat de surface : Pas de couche d'huile ou d'oxyde, nettoyer à l'éthanol si nécessaire.

8.2 Préparation des échantillons

Prélevez un échantillon représentatif de l'ébauche en carbure cémenté ou du produit fini et broyez-le jusqu'à obtenir une granulométrie $< 0,1$ mm.

Sécher à 105°C pendant 1 h, refroidir à température ambiante et peser ($\pm 0,0001$ g).

Prélevez 3 à 5 échantillons parallèles de chaque lot pour garantir des résultats représentatifs.

9 étapes de test

9.1 Décomposition de l'échantillon

Pesez 0,2 g d'échantillon ($\pm 0,0001$ g) et placez-le dans un bécher de 250 mL.

Ajoutez 10 ml d'acide nitrique et 5 ml d'acide sulfurique, chauffez sur une plaque chauffante (200-250 °C) jusqu'à ce que le mélange soit presque sec, puis laissez refroidir.

Ajouter 20 mL d'acide chlorhydrique et continuer à chauffer (150°C) jusqu'à dissolution complète du résidu, puis refroidir.

Diluer avec de l'eau déionisée jusqu'à 100 mL, filtrer (membrane filtrante de 0,45 μm) et réserver.

9.2 Titrage potentiométrique

Prenez 10 ml de la solution d'essai, placez-la dans un gobelet de titrage de 100 ml et ajoutez une solution tampon (pH 5,5).

Ajoutez 2 à 3 gouttes d'indicateur de lutéoline (facultatif) et observez le changement de couleur.

Surveillez le potentiel avec un titrateur potentiométrique, ajoutez une solution standard EDTA à

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

0,01 mol/L et enregistrez le point de saut de potentiel (point final).

Chaque échantillon a été mesuré 3 fois et la valeur moyenne a été calculée.

9.3 Test à blanc

Effectuer un essai à blanc en suivant la même procédure et déduire la valeur à blanc (généralement < 0,05 % de teneur en cobalt).

9.4 Calcul

la teneur en cobalt est calculée comme suit :

$$\text{钴含量 (\%)} = \frac{C \times V \times M \times 100}{m \times 1000}$$

dans:

- C: EDTA 标准溶液浓度 (mol/L);
- V: 消耗 EDTA 体积 (mL);
- M: 钴摩尔质量 (58,93 g/mol);
- m: 试样质量 (g).

10. Expression du résultat

la teneur en cobalt est exprimée en fraction massique (%), avec 2 décimales (par exemple 6,25 %).

Le rapport d'essai doit inclure :

- Numéro de norme : ISO 3909:1976 ;
- Description de l'échantillon : marque, lot, qualité ;
- Conditions d'essai : température, humidité ;
- Modèle d'instrument et état d'étalonnage ;
- Résultats : teneur en cobalt et écart ;
- Date d'essai : par exemple le 21 mai 2025 ;
- Testeur : signature.

11 Précision et biais

11.1 Précision

Répétabilité : L'écart de teneur en cobalt mesuré par le même opérateur, le même équipement et dans un court laps de temps est < 0,2 %.

Reproductibilité : L'écart de teneur en cobalt mesuré par différents laboratoires et différents opérateurs est < 0,5 %.

11.2 Biais

Erreur de l'instrument : titrateur potentiométrique ±0,1 mV.

Inhomogénéité de l'échantillon : un écart de composition > 0,1 % (m/m) entraîne une fluctuation des résultats de 0,3 à 0,5 %.

Éléments interférents : Le biais peut atteindre 1 à 2 % lorsque la phase η ou le carbone libre n'est pas éliminé.

12 facteurs d'influence

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

12.1 Une décomposition incomplète de l'échantillon (par exemple, résidu de tungstène) peut entraîner une sous-estimation de

la teneur en cobalt de 0,5 à 1 %.

12.2 Les éléments interférents tels que le fer (> 5 %) et le nickel (> 2 %) peuvent interférer avec le titrage et nécessiter une pré-séparation.

12.3 Concentration acide

Une acidité trop élevée (pH < 2) entraîne un décalage du point final de titrage EDTA de 0,1 à 0,3 %.

12.4 Conditions environnementales

Une température élevée (> 40 °C) ou une humidité élevée (> 70 %) provoque l'évaporation de la solution, avec un écart de < 0,2 %.

13 Application des résultats des tests

13.1 Le contrôle qualité

vérifie si la teneur en cobalt répond aux exigences de conception, telles que la cible YG6 $6 \pm 0,2\%$.

13.2 Optimisation du processus

Une faible teneur en cobalt indique des ingrédients insuffisants, tandis qu'une teneur élevée en cobalt indique un excès de phase liante.

13.3 Prédiction des propriétés

Une teneur en cobalt de 6 à 10 % correspond à une dureté élevée (HRA 90-92), 10 à 15 % correspond à une ténacité élevée (KIC 12-15 MPa·m^{1/2}).

13.4 Exemple

Dans la production de forets miniers, le YG8 avec une teneur en cobalt de 8,05 % assure une dureté de HRA 90 et une durée de vie de > 200 heures.

14 Notes

14.1 L'instrument doit être étalonné

à l'aide d'une solution de cobalt standard avec une erreur de $\leq \pm 0,1\%$.

14.2 Homogénéité des échantillons

Assurez-vous que les échantillons sont exempts de fissures, de pores et ont une composition uniforme.

14.3 La température de la salle d'essai est contrôlée à 20-25°C et l'humidité est <60%.

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

14.4 Protection de sécurité

Portez des lunettes de protection pendant le fonctionnement pour éviter les éclaboussures d'acide.

15 Annexe (Annexe informative)

Annexe A Valeurs typiques de la teneur en cobalt

Tableau A.1 Teneur en cobalt des nuances courantes de carbure cimenté

Marque	Teneur en cobalt (% m/m)	Dureté (HRA)	Ténacité (KIC, MPa·m ^{1/2})
YG6	6,0 ± 0,2	90-91	10-12
YG8	8,0 ± 0,2	89-90	12-14
YG10	10,0 ± 0,3	88-89	14-16

Annexe B Analyse des erreurs

B.1 Erreur de l'instrument

Titrateur potentiométrique ±0,1 mV.

B.2 Erreur opérationnelle

L'écart du jugement du point final de titrage est de 0,1 à 0,2 %.

B.3 Impact environnemental

Une humidité > 70 % entraîne un écart de 0,2 % dans les résultats.

Annexe C Suggestions d'amélioration

C.1 Utiliser la digestion par micro-ondes pour améliorer l'efficacité de la décomposition et réduire les résidus de tungstène.

C.2 Introduire un système de titrage automatisé pour réduire l'erreur humaine. C.3 Utiliser l'ICP-MS au lieu de la méthode potentiométrique, avec une limite de détection de < 0,0001 µg/mL.

Annexe D Exemples de données de test

Tableau D.1 Données d'essai sur la teneur en cobalt du carbure cimenté YG8

Numéro d'échantillon	Masse (g)	Teneur en cobalt (% m/m)	Valeur moyenne (% m/m)	déviations (%)
YG8-001	0,201	8.05, 8.10	8.08	0,37
YG8-002	0,203	8h00, 8h03	8.02	0,25
YG8-003	0,202	8.12, 8.09	8.11	0,37

Annexe E Impact des éléments d'interférence

Tableau E.1 Effets de différents éléments interférents sur la détermination de la teneur en cobalt

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

Éléments d'interférence	Teneur (% m/m)	Écart (% m/m)	Méthode d'élimination
fer	5	0,5	Ajouter du sel de lanthane
nickel	2	0,3	Pré-séparation
Tungstène	10	1.0	Digestion par micro-ondes

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

Annexe :

Méthodes d'expression de la dureté du carbure cémenté et de sa relation de conversion

Le carbure cémenté, ou métal dur, est largement utilisé dans des domaines industriels tels que les outils de coupe et les moules, en raison de sa dureté élevée et de sa résistance à l'usure. Sa dureté est un indicateur clé de performance. La méthode d'expression de la dureté du carbure cémenté repose principalement sur diverses normes et unités d'essai, les plus courantes étant la dureté Vickers (HV), la dureté Rockwell (HRA, HRC) et la dureté Knoop (HK). Le choix spécifique dépend des conditions d'essai et des pratiques industrielles. Cet article présente en détail la méthode d'expression de la dureté, le principe d'essai, les scénarios applicables et la relation de conversion du carbure cémenté, en combinant données et normes (telles que ISO, ASTM, GB/T) pour garantir exactitude et exhaustivité.

Méthode d'expression de la dureté du carbure cémenté

Le test de dureté du carbure cémenté est généralement effectué par les méthodes suivantes, en raison de sa dureté élevée et des caractéristiques du matériau composite (comme le carbure de tungstène WC et la phase liante cobalt Co) :

1. Dureté Vickers (HV)

Définition : Une charge spécifique (telle que 10 kgf, 30 kgf) est appliquée à la surface du matériau à travers un pénétrateur pyramidal quadrangulaire en diamant (angle diagonal 136°) pour mesurer la longueur diagonale de l'indentation et calculer la valeur de dureté.

formule :

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

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

Unité : HV (par exemple HV10 signifie une charge de 10 kgf).

Scénarios applicables :

Essai standard pour le carbure cémenté, largement utilisé dans les normes ISO 3878, GB/T 7997 (essai de dureté Vickers du carbure cémenté).

Convient aux matériaux de haute dureté (plage de dureté du carbure 14002200 HV) et de haute précision.

Différentes granulométries (telles que les grains ultrafins < 0,5 µm, les grains moyens 12 µm) sont applicables.

Valeurs typiques :

YG6 (6 % de cobalt) : ~15001600 HV30.

YG8 (8 % de cobalt) : ~14001500 HV30.

Carbure cémenté à grains ultrafins : ~18002200 HV30 (ScienceDirect, 2020).

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

Avantage :

Applicable à une large gamme de dureté (503000 HV).

Petite indentation, adaptée aux échantillons fins et petits, haute précision.

Inconvénients : temps de test long (un microscope est nécessaire pour la mesure de l'indentation) et exigences élevées en matière de finition de surface.

2. Dureté Rockwell (HRA)

Définition : Utiliser un pénétrateur à cône diamant (angle au sommet 120°, rayon de pointe 0,2 mm), appliquer une charge totale de 60 kgf (précharge 10 kgf, charge principale 50 kgf), mesurer la différence de profondeur d'indentation et calculer la dureté.

Formule :

$$\text{HRA} = 100 - \frac{h}{0.002}$$

Où h est la profondeur de pénétration (mm).

Unité : HRA.

Scénarios applicables :

Test rapide des outils et matrices en carbure conformément aux normes ISO 3738 et GB/T 230.1.

Convient au carbure cémenté à dureté plus élevée (HRA 8092), couramment utilisé dans les sites industriels.

Valeurs typiques :

YG6 : ~8990 HRA.

YG8 : ~8889 HRA.

Carbure cémenté à grains ultrafins : ~9092 HRA (Sandvik, 2023).

Avantage :

Le test est rapide et la lecture est directe, adapté aux tests par lots.

Il présente de faibles exigences en matière de surface et est facile à utiliser.

Court terme :

Moins précis que la dureté Vickers et convient uniquement aux plages de dureté supérieures (HRA > 70).

Ne convient pas aux échantillons ultra-minces ou minuscules.

3. Dureté Rockwell (HRC, utilisation secondaire)

Définition : Utiliser un pénétrateur à cône diamanté (identique au HRA) avec une charge totale de 150 kgf pour mesurer la profondeur de pénétration.

Scénarios applicables :

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

Utilisé pour les nuances plus douces de carbure cimenté (par exemple, teneur élevée en cobalt > 15 %) ou par rapport à l'acier rapide.

Il est moins utilisé dans le carbure cimenté car la plage HRC (2070) ne couvre pas entièrement la dureté élevée du carbure cimenté (ScienceDirect, 2020).

Valeurs typiques :

YG15 (15 % de cobalt) : ~6567 HRC.

Avantages : Couramment utilisé par rapport à la dureté de l'acier à outils et de l'acier à matrice.

Inconvénients : charge élevée, grande indentation, ne convient pas aux tests courants du carbure cimenté.

4. Dureté Knoop (HK)

Définition : Utilisez un pénétrateur en losange diamanté (rapport axe majeur-axe court 7:1, angles 172,5° et 130°), appliquez une charge légère (par exemple 0,51 kgf) et mesurez la longueur diagonale longue de l'empreinte.

formule :

$$HK = \frac{14.229 \cdot F}{d^2}$$

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

Unité : HK.

Scénarios applicables :

Essais de couches minces, de revêtements ou de structures à grains ultra-fins de carbure cimenté conformément à la norme ASTM E384.

Convient pour l'analyse de la dureté de petites surfaces ou de surfaces (comme le revêtement en carbure).

Valeurs typiques :

YG6 : ~16001700 HK0,5.

Carbure cimenté à grains ultrafins : ~20002300 HK0,5.

avantage :

Indentation peu profonde, adaptée aux échantillons minces ou aux revêtements.

Haute résolution, adaptée aux tests de microdureté.

défaut :

Le test est complexe et nécessite un microscope de haute précision.

Faible charge, sensible aux défauts de surface.

5. Autres méthodes de représentation (moins couramment utilisées)

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

Dureté Brinell (HB) : Utiliser un pénétrateur à bille en carbure avec une charge de 3000 kgf, adapté aux carbures de faible dureté (rare, car l'indentation est trop grande).

Dureté Shore (HS) : Test de dureté aux chocs, rarement utilisé pour le carbure cimenté en raison de sa faible précision.

Dureté Mohs : Le carbure cimenté est d'environ 8,59 (proche du corindon), ce qui n'est utilisé qu'à des fins de comparaison scientifique et n'est pas précis.

Support de données :

Plage de dureté du carbure : 1400-2200 HV, 8092 HRA (ISO 3878, GB/T 7997).

Nuances typiques : YG8 (1400-1500 HV, 8889 HRA), grain ultrafin (1800-2200 HV, 9092 HRA) (Sandvik, 2023).

Relation de conversion des unités de dureté

L'essai de dureté du carbure cimenté utilise différentes unités (HV, HRA, HRC, HK), qui doivent être converties selon la table de conversion standard ou la formule empirique. Voici les relations de conversion et les précautions à prendre :

1. Tables de conversion courantes

Ce qui suit est une conversion approximative des valeurs de dureté courantes du carbure cimenté, basée sur la norme ASTM E140 (tableau de conversion de dureté), GB/T 1172 (spécification de conversion de dureté) et les données de l'industrie :

HT	HRA	HRC	Hong Kong	Remarque
1200	85,0	~60	~1250	Carbure cimenté à faible teneur en cobalt (tel que YG15)
1400	87,0	~63	~1450	Carbure cimenté général (tel que YG8)
1500	88,0	~65	~1550	Carbure cimenté général (tel que YG6)
1600	89,0	~66	~1650	Carbure cimenté à grains moyens et fins
1800	90,5	~68	~1850	Carbure cimenté à grains ultrafins
2000	91,5	~70	~2050	Carbure cimenté à haute dureté
2200	92,0	~72	~2250	Carbure de dureté extrême

Source des données :

ASTM E14012b(2023) : Tableau de conversion de dureté.

GB/T 11721999 : norme chinoise de conversion de dureté.

Pratique industrielle : données de dureté du carbure Sandvik, Kennametal (Sandvik, 2023).

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

2. Formule de conversion (formule empirique)

Une conversion précise nécessite la prise en compte des propriétés du matériau. Il n'existe pas de formule unifiée pour le carbure cémenté en raison de sa structure composite (WC+Co). Voici une formule empirique couramment utilisée à titre de référence :

HV et HRA :

$$\text{HRA} \approx 100 - \frac{4000}{\text{HV}}$$

Exemple : HV=1500, HRA $\approx 100 - \frac{4000}{1500} \approx 87,3$.

HV et HRC (gamme de dureté élevée du carbure cémenté) :

$$\text{HRC} \approx 0.035 \cdot \text{HV} + 12$$

Exemple : HV=1500, HRC $\approx 0,035 \times 1500 + 12 \approx 64,5$.

HV et HK :

$$\text{HK} \approx \text{HV} \cdot (1.05 \text{ à } 1.10)$$

Exemple : HV=1500, HK $\approx 1500 \times 1,07 \approx 1605$.

Avis :

La formule de conversion est approximative, avec une erreur de $\pm 25\%$ en raison des différentes tailles de grains de carbure cémenté et de la teneur en cobalt.

Dans la plage de dureté élevée (HV > 1500), l'erreur de conversion HRC est importante, il est donc recommandé de mesurer directement HRA ou HV.

3. Considérations relatives à la conversion

Différence matérielle

La dureté du carbure cémenté dépend de la teneur en cobalt (5 à 15 %) et de la granulométrie (0,52 μm). La conversion doit se faire en fonction de la nuance spécifique (par exemple, YG6, YG8).

Conditions de test :

HV : La charge (1030 kgf) affecte le résultat et doit être indiquée (par exemple HV30).

HRA : Convient au carbure cémenté, le HRC est limité aux nuances de faible dureté.

HK : Faible charge (0,5 kgf), adaptée aux micro-tests.

Référence standard : utilisez le tableau de conversion ASTM E140 ou GB/T 1172 pour éviter les erreurs de formule empiriques.

La mesure réelle est préférée : la conversion est donnée à titre indicatif uniquement, le test direct de l'unité de dureté cible est plus précis.

Support de données :

YG8 : HV30 ≈ 1400 , HRA ≈ 88 , HRC ≈ 63 (GB/T 7997).

Carbure cémenté à grains ultrafins : HV30 ≈ 2000 , HRA $\approx 91,5$ (Sandvik, 2023).

Application des tests de dureté du carbure cémenté

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

Contrôle qualité : Les tests de dureté vérifient les performances des nuances de carbure cémenté, telles que YG6 (1500 HV, 89 HRA) pour l'usinage grossier et le grain ultra-fin (2000 HV, 91 HRA) pour la finition.

Optimisation des procédés : La dureté reflète l'effet de frittage. Les gros grains ($> 2 \mu\text{m}$) réduisent la dureté, tandis que la phase η (Co₃W₃C) réduit la ténacité (ISO 3326:2013).

Sélection d'outils :

Dureté élevée (HV 1800/2200) : convient à la découpe à grande vitesse de matériaux durs (acier inoxydable, alliage de titane).

Dureté moyenne (HV 1400/1600) : convient au traitement général (fonte, acier).

Comparé aux matériaux extra-durs :

Carbure cémenté : 1400-2200 HV, inférieur au diamant (8000-10000 HV) et au CBN (4500 HV).

Le carbure cémenté a une meilleure ténacité que les matériaux ultra-durs et convient aux charges d'impact (Wikipedia, 2024).

En conclusion

La dureté du carbure cémenté comprend principalement :

Dureté Vickers (HV) : 1400-2200 HV, haute précision, adaptée aux tests standards (ISO 3878).

Dureté Rockwell (HRA) : 8092 HRA, rapide, couramment utilisée dans l'industrie (GB/T 230.1).

Dureté Rockwell (HRC) : 6570 HRC, limitée aux nuances de faible dureté.

Dureté Knoop (HK) : 1500-2300 HK, convient aux tests de couches minces et de micro-essais (ASTM E384).

Relation de conversion :

HT et HRA : $\text{HRA} \approx 100 - 4000/\text{HV}$.

HV et HRC : $\text{HRC} \approx 0,035 \times \text{HV} + 12$ (une dureté élevée entraîne une erreur importante).

HV et HK : $\text{HK} \approx \text{HV} \times 1,051,10$.

Il est recommandé d'utiliser les tables de conversion ASTM E140 et GB/T 1172, et un test direct de l'unité cible est préférable.

L'essai de dureté du carbure est essentiel au contrôle qualité et au choix des outils. La méthode appropriée doit être choisie en fonction de la nuance (YG6, YG8), de la granulométrie et des exigences de traitement. La conversion doit être effectuée avec prudence et combinée aux mesures réelles pour garantir la précision.

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

Annexe :

Caractéristiques, facteurs d'influence, méthodes d'essai, cas d'application et mesures d'optimisation de diverses propriétés du carbure cémenté

Performance	Caractéristiques	Facteurs d'influence	Méthode d'essai	Cas d'application	Mesures d'optimisation
Dureté	Dureté élevée (1 400-2 200 HV, 8 092 HRA), forte résistance à l'usure, deuxième après les matériaux extra-durs (comme le diamant 8 000 HV). Valeurs typiques : YG6 (1 500 HV30, 89 HRA), YG8 (1 400 HV30, 88 HRA), grain ultrafin (2 000 HV30, 91 HRA) (Sandvik, 2023). Tendance : La dureté augmente de façon exponentielle avec la diminution de la taille des grains.	Granulométrie : Grain ultrafin (<0,5 μm) dureté 1800-2200 HV, grain moyen (12 μm) 1400-1600 HV. Teneur en cobalt : 6 % de cobalt a une dureté élevée, 15 % de cobalt diminue la dureté de 10-15 %. Impuretés : la phase η réduit la dureté de 5-10 %, le carbone libre la réduit de 35 %. Température de frittage : >1450°C, grains grossiers, la dureté diminue de 10 %.	Dureté Vickers (HV30, ISO 3878) : charge de 30 kgf, pénétrateur pyramidal carré diamant, mesure de la profondeur d'indentation diagonale. Dureté Rockwell (HRA, GB/T 230.1) : charge de 60 kgf, pénétrateur conique diamant, mesure de la profondeur d'indentation. Erreur : ± 2 % (ASTM E18).	L'outil YG6 (1500 HV) usine la fonte à une vitesse de 150 m/min et a une durée de vie de 2 heures. L'outil à grain ultrafin (2000 HV) usine l'acier inoxydable à une vitesse de 300 m/min et a une durée de vie de 3 heures.	L'utilisation d'une poudre ultrafine (< 0,5 μm) permet d'augmenter la dureté à 2 000 HV et d'améliorer la résistance à l'usure de 20 %. En maintenant la teneur en cobalt à 68 %, la dureté est augmentée de 5 à 10 %. La température de frittage est de 1 350 à 1 400 °C, réduisant ainsi la phase η (GB/T 3849). L'ajout de TaC (0,51 %) inhibe la croissance des grains et augmente la dureté de 5 %.
Dureté	Ténacité moyenne, résistance aux chocs supérieure à celle des matériaux extra-durs, inférieure à celle de l'acier rapide, adaptée à la coupe à moyenne et grande vitesse. Valeurs typiques : YG6 (KIC 8 MPa·m ^{1/2}), YG8 (10 MPa·m ^{1/2}), YG15 (12 MPa·m ^{1/2}) (ScienceDirect, 2020). Tendance : La ténacité augmente linéairement avec la teneur en cobalt.	Teneur en cobalt : 6 % Co KIC ~8 MPa·m ^{1/2} , 15 % Co KIC ~12 MPa·m ^{1/2} . Taille des grains : 12 μm a une ténacité élevée, <0,5 μm a une diminution de 20 % de la ténacité. Défauts : Une porosité > 0,1 % a une diminution de 15 % de la ténacité et la phase η a une diminution de 10 %. Phase liante : Une phase de cobalt inégale réduit la résistance aux chocs de 10 %.	Ténacité à la rupture (KIC, ASTM E399) : Échantillon de poutre entaillée à bord unique (SENB), essai de flexion 3 points, mesure de l'extension des fissures. Ténacité aux chocs (GB/T 229) : Essai de choc Charpy, calcul de l'absorption d'énergie. Erreur : ± 5 %.	L'outil YG15 (KIC 12 MPa·m ^{1/2}) emboutit des plaques d'acier avec une durée de vie aux chocs de 100 000 fois. L'outil YG8 (KIC 10 MPa·m ^{1/2}) traite l'acier avec une meilleure résistance à l'écaillage que l'YG6.	En augmentant la teneur en cobalt à 15 % (par exemple, YG15), le KIC atteint 12 MPa·m ^{1/2} et la résistance aux chocs augmente de 30 %. L'utilisation de grains moyens (12 μm) augmente la ténacité de 15 %. Avec le frittage sous vide + HIP, la porosité est réduite à < 0,01 % et la ténacité augmente de 10 %. L'ajout de Cr3C2 (0,5 %) améliore l'uniformité de la phase cobalt et augmente la ténacité de 5 %.
Résistance à la compression	Résistance à la compression élevée (46 GPa), adaptée aux charges de pression élevées, supérieure à celle de l'acier rapide (~2 GPa). Valeurs typiques : YG6 (5 GPa), YG8 (4,8 GPa), grain ultrafin (6 GPa) (ASTM B406). Tendance : La résistance à la compression augmente légèrement avec la diminution de la granulométrie.	Teneur en cobalt : 6 % de cobalt a une résistance élevée, > 15 % de cobalt a une baisse de résistance de 10 %. Taille des grains : Les grains ultrafins (< 0,5 μm) ont une résistance de 6 GPa, les grains moyens (12 μm) ont une résistance de 4,8 GPa. Défauts : Une porosité > 0,1 % a une baisse de résistance de 15 % et le carbone libre a une baisse	Résistance à la compression (GB/T 3851) : Éprouvette cylindrique, compression uniaxiale, mesure de la charge maximale. Conditions d'essai : température ambiante, vitesse de charge 0,5 mm/min. Erreur : ± 3 %.	Le foret minier YG6 (5 GPa) résiste aux impacts de roches à haute pression et a une durée de vie de 100 heures. La matrice à grains ultrafins (6 GPa) est utilisée pour l'emboutissage à haute charge et résiste à la déformation.	Maintenir la teneur en cobalt à 68 % et la résistance à 56 GPa. Utiliser des grains ultrafins (< 0,5 μm) pour augmenter la résistance à 6 GPa. Utiliser le procédé HIP pour réduire la porosité à < 0,01 % et augmenter la résistance de 10 %. Maintenir la teneur en carbone (± 0,1 %) pour éviter la

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

Performance	Caractéristiques	Facteurs d'influence	Méthode d'essai	Cas d'application	Mesures d'optimisation
		de 5 %. Qualité du frittage : Une sous-cuisson (< 1350 °C) a une mauvaise liaison et une baisse de résistance de 10 %.			formation de carbone libre (GB/T 3849).
Résistance à la flexion	Résistance à la flexion moyenne (1,5-2,5 GPa), adaptée aux outils et moules pour supporter les charges de flexion. Valeurs typiques : YG6 (2 GPa), YG8 (2,2 GPa), YG15 (2,5 GPa) (ASTM B406). Tendence : La résistance à la flexion augmente avec la teneur en cobalt.	Teneur en cobalt : 6 % de cobalt environ 2 GPa, 15 % de cobalt environ 2,5 GPa. Granulométrie : 12 µm pour une résistance élevée, < 0,5 µm pour une résistance légèrement réduite de 5 %. Défauts : La porosité et la phase η réduisent la résistance de 10 %. Qualité du frittage : Une structure irrégulière réduit la résistance de 10 %.	Résistance à la flexion (ASTM B406) : éprouvette de flexion 3 points, portée 20 mm, charge 0,5 mm/min. Conditions d'essai : température ambiante. Erreur : ± 4 %.	L'outil YG8 (2,2 GPa) traite l'acier, avec une bonne résistance à la flexion et à la rupture. L'outil YG15 (2,5 GPa) emboutit les pièces automobiles, avec une durée de vie de 120 000 fois.	L'augmentation de la teneur en cobalt à 15 % (par exemple, YG15) augmente la résistance à 2,5 GPa. L'utilisation de grains moyens (12 µm) augmente la résistance de 10 %. L'utilisation de HIP pour réduire la porosité augmente la résistance de 15 %. L'ajout de Cr3C2 (0,51 %) pour renforcer la phase de liaison augmente la résistance de 5 %.
Résistance à la traction	La résistance à la traction est faible (0,5-1,0 GPa) et le carbure cémenté ne supporte pas bien les charges de traction. Valeurs typiques : YG6 (0,7 GPa), YG8 (0,8 GPa), YG15 (1,0 GPa) (ScienceDirect, 2020). Tendence : La résistance à la traction augmente légèrement avec la teneur en cobalt.	Teneur en cobalt : 6 % de cobalt ~ 0,7 GPa, 15 % de cobalt ~ 1,0 GPa. Granulométrie : 12 µm a une résistance plus élevée, < 0,5 µm réduit légèrement de 5 %. Défauts : Les fissures et les pores réduisent la résistance de 20 %. Phase liante : Une phase de cobalt irrégulière réduit la résistance de 10 %.	Résistance à la traction (GB/T 228.1) : éprouvette de traction, traction axiale, mesure de la charge de rupture. Conditions d'essai : température ambiante, vitesse de traction de 1 mm/min. Erreur : ± 5 %.	La filière de tréfilage YG15 (1,0 GPa) résiste à la traction et a une durée de vie de 50 000 fois supérieure. L'outil YG8 (0,8 GPa) présente une meilleure résistance à la rupture par traction que l'outil YG6 lors de l'usinage.	L'augmentation de la teneur en cobalt à 15 % augmente la résistance à 1,0 GPa. L'utilisation de grains moyens (12 µm) augmente la résistance de 10 %. L'optimisation du frittage sous vide réduit le taux de fissuration à < 0,1 % et augmente la résistance de 15 %. L'ajout de Ni (35 %) ou de Cr3C2 améliore la ténacité et augmente la résistance de 5 %.
Résistance à l'usure	Excellente résistance à l'usure, durée de vie 510 fois supérieure à celle de l'acier rapide, convient à l'usinage à grande vitesse. Valeurs typiques : YG6 (taux d'usure < 0,01 mm³/N·m), grain ultrafin (< 0,005 mm³/N·m) (Sandvik, 2023). Tendence : la résistance à l'usure augmente avec l'indice de dureté.	Dureté : 2000 HV La résistance à l'usure est meilleure que 1400 HV (durée de vie multipliée par 2). Granulométrie : Grain ultrafin (< 0,5 µm). Le taux d'usure est divisé par deux. Conditions de fonctionnement : > 800°C ou vitesse > 500 m/min. L'usure est augmentée. Revêtement : Sans revêtement, le taux d'usure est 3 fois plus élevé.	Essai d'usure (ASTM G65) : La meule use l'éprouvette et mesure la perte de volume. Conditions d'essai : sable sec, charge 130 N. Erreur : ± 5 %.	Outil YG6 (0,01 mm³ / N·m) pour l'usinage de la fonte, durée de vie 2 heures. Outil grain ultrafin + revêtement TiN (0,005 mm³ / N·m) pour l'usinage de l'acier inoxydable, durée de vie 4 heures.	Grâce à des grains ultrafins (HV 2000+), le taux d'usure est réduit à < 0,005 mm³ / N · m. L'application d'un revêtement TiN / Al2O3 (510 µm, CVD/PVD) multiplie la durée de vie par 23. L'optimisation de la vitesse de coupe (100 300 m/min) réduit l'usure. L'ajout de TaC (0,51 %) augmente la résistance à l'usure abrasive de 10 %.

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

Performance	Caractéristiques	Facteurs d'influence	Méthode d'essai	Cas d'application	Mesures d'optimisation
Résistance à la chaleur	Bonne résistance à la chaleur (800-1 000 °C), supérieure à celle de l'acier rapide (500-600 °C), adaptée à la coupe à haute température. Valeurs typiques : YG6 (900 °C), base TiC (1 000 °C) (ScienceDirect, 2020). Tendence : La résistance à la chaleur augmente avec la proportion de TiC.	Teneur en cobalt : > 15 % Le cobalt se ramollit à haute température et la dureté rouge diminue de 20 %. Phase dure : TiC et TaC ont une meilleure résistance à la chaleur que le WC (augmentée de 100 °C). Revêtement : La résistance à la chaleur diminue de 30 % sans revêtement. Microstructure : Une structure irrégulière a une faible stabilité à haute température.	Essai de dureté rouge (GB/T 4340) : Chauffer l'échantillon à 800-1000 °C et mesurer le taux de rétention de dureté. Essai de choc thermique : Cycle de chauffage et de refroidissement, évaluation des fissures. Erreur : ± 5 %.	Outil YG6 (900 °C) pour l'usinage de l'acier, résistant à l'usure à haute température. Outil à base de TiC + revêtement Al2O3 (1000 °C) pour l'usinage des alliages de titane, durée de vie 3 heures.	La réduction de la teneur en cobalt (< 8 %) augmente la dureté rouge de 10 %. L'ajout de TiC / TaC (510 %) augmente la résistance à la chaleur jusqu'à 1 000 °C. L'application d'un revêtement Al2O3 (58 μm) augmente l'isolation thermique de 20 %. L'utilisation d'une structure à gradient (cobalt de surface < 5 %) augmente les performances à haute température de 15 %.
Résistance à la corrosion	Bonne résistance à la corrosion, aux acides et aux alcalis, convient aux traitements par voie humide ou aux environnements chimiques. Valeurs typiques : YG6 (taux de corrosion < 0,01 mm/an, solution neutre), base nickel (< 0,005 mm/an) (Wikipedia, 2024). Tendence : La résistance à la corrosion augmente avec la proportion de nickel.	Phase cobalt : Le taux de corrosion du cobalt augmente 5 fois dans une solution à pH < 4, et le nickel est plus résistant aux acides. Environnement : La corrosion en solution acide s'intensifie. Microstructure : Une porosité > 0,1 % ou du carbone libre augmente la corrosion de 10 %. Revêtement : Le taux de corrosion est 2 fois plus élevé sans revêtement.	Essai de corrosion (ASTM G31) : L'échantillon est immergé dans une solution neutre/acide (pH 47) et la perte de masse est mesurée. Conditions d'essai : 25 °C, 30 jours. Erreur : ± 3 %.	Outil YG6 (0,01 mm/an) avec arrosage humide, durée de vie 1 000 heures. Moule à base de nickel + revêtement CrN (0,005 mm/an) pour environnement acide, durée de vie 1 an.	Grâce à l'utilisation d'un liant à base de nickel (Ni 510 %), la vitesse de corrosion est réduite à < 0,005 mm/an. L'application d'un revêtement TiN/CrN (510 μm) double la résistance à la corrosion. L'optimisation du HIP permet de réduire la porosité < 0,01 % et les points de corrosion de 15 %. La teneur en carbone est contrôlée et le carbone libre est évité (GB/T 3849).

Notes supplémentaires

1. Support de données

Dureté : YG6 (1500 HV30, 89 HRA), grain ultrafin (2000 HV30, 91 HRA) (ISO 3878, GB/T 7997).

Ténacité : YG6 (8 MPa·m^{1/2}), YG15 (12 MPa·m^{1/2}) (ScienceDirect, 2020).

Résistance : compression 46 GPa, flexion 1,52,5 GPa (ASTM B406), traction 0,51,0 GPa (ScienceDirect, 2020).

Résistance à l'usure : la durée de vie de l'outil revêtu est multipliée par 23 (Sandvik, 2023).

Résistance à la chaleur : résistance à la chaleur à base de TiC 1000°C (ScienceDirect, 2020).

Résistance à la corrosion : taux de corrosion à base de nickel < 0,005 mm/an (Wikipedia, 2024).

2. Interaction des facteurs d'influence

Grain et cobalt : Les grains ultrafins (< 0,5 μm) améliorent la dureté et la résistance à la compression,

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

la teneur élevée en cobalt (1015 %) améliore la ténacité et la résistance à la flexion/traction.
Procédé de frittage : Le frittage sous vide (1350-1400°C) + HIP réduit la porosité (<0,01%) et améliore toutes les propriétés (ISO 3326:2013).
Additifs : TaC (0,51 %) améliore la dureté et la résistance à l'usure, Cr3C2 (0,5 %) améliore la ténacité et la résistance à la flexion, TiC (510 %) améliore la résistance à la chaleur.
Revêtement : TiN /Al2O3 (510 µm) améliore la résistance à l'usure et à la chaleur, CrN améliore la résistance à la corrosion.

3. Référence standard

Dureté : ISO 3878 (HV), GB/T 230.1 (HRA), ASTM E18.
Ténacité : ASTM E399 (KIC), GB/T 229 (impact).
Résistance : GB/T 3851 (compression), ASTM B406 (flexion), GB/T 228.1 (traction).
Résistance à l'abrasion : ASTM G65.
Résistance à la chaleur : GB/T 4340.
Résistance à la corrosion : ASTM G31.
Aimants au cobalt : GB/T 3849, vérifiant la teneur en cobalt et le bilan carbone.

En conclusion

Les propriétés du carbure cémenté (dureté, ténacité, résistance à la compression/flexion/traction, résistance à l'usure, résistance à la chaleur, résistance à la corrosion) sont déterminées par la granulométrie, la teneur en cobalt, les additifs, le processus de frittage et le revêtement :

Dureté : Grain ultrafin + faible teneur en cobalt (6%) jusqu'à 2000 HV, résistance à l'usure augmentée de 20%.

Ténacité : Cobalt élevé (15%) + grain moyen, KIC jusqu'à $12 \text{ MPa} \cdot \text{m}^{1/2}$, résistance aux chocs augmentée de 30%.

Résistance à la compression : Le grain ultrafin + HIP atteint 6 GPa, soit une augmentation de 10 %.

Résistance à la flexion : Le cobalt élevé + HIP atteint 2,5 GPa, soit une augmentation de 25 %.

Résistance à la traction : Le cobalt élevé + Ni atteint 1,0 GPa, soit une augmentation de 30 %.

Résistance à l'usure : Grain ultrafin + revêtement TiN, taux d'usure $< 0,005 \text{ mm}^3 / \text{N} \cdot \text{m}$, durée de vie augmentée de 23 fois.

Résistance à la chaleur : TiC / TaC + faible teneur en cobalt, résistance à la chaleur 1000°C, augmentation de 20%.

Résistance à la corrosion : Revêtement à base de nickel + CrN, taux de corrosion $< 0,005 \text{ mm/an}$, augmenté de 2 fois.

En contrôlant avec précision la taille des grains, la teneur en cobalt, les paramètres de frittage et le revêtement, combinés à des tests standard (tels que GB/T 3849), les performances du carbure cémenté peuvent être optimisées pour répondre aux exigences d'application des outils, des moules, de l'exploitation minière, etc.

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

Annexe :

Relation entre la dureté et la résistance du carbure cimenté

Le carbure cimenté, ou métal dur, est largement utilisé dans les outils de coupe, les moules et d'autres domaines en raison de sa dureté élevée et de sa résistance appropriée. Dureté et résistance sont deux propriétés clés du carbure cimenté, mais il existe une interaction complexe entre elles, influencée par la microstructure (comme la granulométrie, la teneur en cobalt), la composition et le procédé de fabrication. Cet article analyse en détail la relation entre dureté et résistance du carbure cimenté, incluant sa définition, les facteurs d'influence, les tendances de la relation, les données quantitatives, les méthodes d'essai et les applications pratiques, en s'appuyant sur les normes (telles que ISO, ASTM, GB/T) et les données du secteur pour garantir un contenu précis et exhaustif.

1. Définition de la dureté et de la résistance

Définition de la dureté du carbure cimenté

La dureté du carbure cimenté indique sa capacité à résister à la déformation plastique locale ou aux rayures, et reflète généralement sa résistance à l'usure et à l'usure abrasive.

Méthode de mesure :

Dureté Vickers (HV) : ISO 3878, charge de 30 kgf, pénétrateur pyramidal carré diamant, mesure diagonale d'indentation (unité : HV30).

Dureté Rockwell (HRA) : GB/T 230.1, charge de 60 kgf, pénétrateur à cône diamant, mesure de la profondeur d'indentation (unité : HRA).

Valeurs typiques : YG6 (1500 HV30, 89 HRA), YG8 (1400 HV30, 88 HRA), grain ultrafin (2000 HV30, 91 HRA) (Sandvik, 2023).

Définition de la résistance du carbure cimenté

La résistance du carbure cimenté fait référence à sa capacité à résister aux dommages causés par des forces externes, notamment la résistance à la compression, la résistance à la flexion et la résistance à la traction.

Méthode de mesure :

Résistance à la compression : GB/T 3851, compression uniaxiale d'éprouvettes cylindriques, mesure de la charge maximale (unité : GPa).

Résistance à la flexion : ASTM B406, éprouvette de flexion en 3 points, mesurant la charge de rupture (unité : GPa).

Résistance à la traction : GB/T 228.1, éprouvette de traction axiale, mesurant la charge de rupture (unité : GPa).

Valeurs typiques :

Résistance à la compression : YG6 (5 GPa), YG8 (4,8 GPa), grain ultrafin (6 GPa) (ASTM B406).

Résistance à la flexion : YG6 (2 GPa), YG8 (2,2 GPa), YG15 (2,5 GPa) (ASTM B406).

Résistance à la traction : YG6 (0,7 GPa), YG8 (0,8 GPa), YG15 (1,0 GPa) (ScienceDirect, 2020).

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

2. Relation entre la dureté et la résistance

La dureté et la résistance du carbure cémenté ne sont pas une simple relation linéaire, mais un compromis complexe, qui se manifeste principalement dans :

Dureté et résistance à la compression : Il existe généralement une corrélation positive. Les carbures cémentés à dureté élevée (comme les grains ultrafins) présentent également une résistance à la compression élevée, car la proportion de phase dure (WC) est élevée et les grains sont fins.

Dureté et résistance à la flexion/traction : elles sont souvent négativement ou faiblement corrélées. Une dureté élevée (faible teneur en cobalt, grains ultrafins, par exemple) s'accompagne généralement d'une ténacité réduite, ce qui entraîne une diminution de la résistance à la flexion et à la traction.

Principaux facteurs d'influence : la taille des grains, la teneur en cobalt et la microstructure (pores, phase η) régulent conjointement l'équilibre entre dureté et résistance.

Quantifier les tendances relationnelles

Dureté augmentée (par exemple de 1400 HV à 2000 HV) :

Résistance à la compression : Augmentée de 1020 % (par exemple de 4,8 GPa à 6 GPa).

Résistance à la flexion : Peut diminuer de 5 à 15 % (par exemple de 2,2 GPa à 1,8 GPa).

Résistance à la traction : diminution de 1020 % (par exemple de 0,8 GPa à 0,6 GPa).

Raison : Les carbures cémentés à dureté élevée (tels que les grains ultrafins $< 0,5 \mu\text{m}$, à faible teneur en cobalt 6 %) ont une proportion élevée de phase dure, une forte liaison entre les grains et une résistance à la compression améliorée ; mais une faible teneur en cobalt et des grains fins réduisent la ténacité et affaiblissent la résistance à la flexion/traction.

Données à l'appui de la relation entre la dureté et la résistance du carbure cémenté

Marque	Dureté (HV30)	Résistance à la compression (GPa)	Résistance à la flexion (GPa)	Résistance à la traction (GPa)
YG6	1500	5.0	2.0	0,7
YG8	1400	4.8	2.2	0,8
YG15	1300	4,5	2,5	1.0
Grain ultrafin	2000	6.0	1.8	0,6

Source : Sandvik (2023), ScienceDirect (2020), ASTM B406.

3. Principaux facteurs affectant la relation entre la dureté et la résistance

Taille des grains

Influence:

Grains ultrafins ($< 0,5 \mu\text{m}$) : dureté élevée (1800-2200 HV), résistance à la compression élevée (6 GPa), mais faible résistance à la flexion/traction (1,8 GPa /0,6 GPa), en raison d'une ténacité réduite.

Cristal moyen (12 μm) : dureté moyenne (1400-1600 HV), résistance élevée à la flexion/traction (2,2-2,5 GPa /0,8-1,0 GPa) et bonne ténacité.

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

Tendance : La taille des grains diminue, la dureté et la résistance à la compression augmentent, la résistance à la flexion/traction diminue.

Quantification : La granulométrie est réduite de 2 μm à 0,5 μm , la dureté augmente de 20 à 30 %, la résistance à la compression augmente de 10 % et la résistance à la flexion diminue de 10 %.

Teneur en cobalt

Influence:

Faible teneur en cobalt (6 %) : dureté élevée (1 500-2 000 HV), résistance à la compression élevée (56 GPa), mais faible résistance à la flexion/traction (2 GPa / 0,7 GPa) en raison de la faible quantité de phase cobalt et de la faible ténacité.

Haute teneur en cobalt (15 %) : faible dureté (1300 HV), résistance élevée à la flexion/traction (2,5 GPa / 1,0 GPa), grâce à la phase cobalt améliorant la ténacité.

Tendance : à mesure que la teneur en cobalt augmente, la dureté et la résistance à la compression diminuent, tandis que la résistance à la flexion/traction augmente.

Quantification : Lorsque le cobalt augmente de 6 % à 15 %, la dureté diminue de 1015 %, la résistance à la compression diminue de 10 % et la résistance à la flexion augmente de 20 %.

Microstructure

Porosité : Une porosité > 0,1 % réduit la résistance à la compression de 15 % et la résistance à la flexion/traction de 20 %, avec un faible effet sur la dureté (< 5 %).

Phase η (Co₃W₃C) : formée par un manque de carbone, réduisant la dureté de 5 à 10 %, la résistance à la compression de 10 % et la résistance à la flexion/traction de 15 %.

Carbone libre : une précipitation excessive de carbone réduit la dureté de 35 %, la résistance à la compression de 5 % et la résistance à la flexion/traction de 10 %.

Quantification : Élimination de la porosité (compression isostatique à chaud HIP), résistance à la flexion augmentée de 15 %, résistance à la traction augmentée de 20 %.

Procédé de frittage

Influence:

Cuisson excessive à haute température (>1450°C) : grains grossiers, dureté réduite de 10%, résistance à la compression réduite de 5%, résistance à la flexion/traction réduite de 10%.

Sous-cuit (<1350°C) : mauvaise adhérence, dureté réduite de 5%, résistance à la compression/flexion/traction réduite de 1015%.

HIP : Élimine la porosité, augmente la résistance à la compression de 10 % et augmente la résistance à la flexion/traction de 15 %.

Tendance : L'optimisation de la température de frittage (1350-1400°C) et du HIP améliore la résistance avec moins d'impact sur la dureté.

Additif

TaC, TiC : Augmente la dureté de 5 à 10 %, la résistance à la compression de 5 %, mais diminue légèrement la résistance à la flexion/traction de 5 % (en raison d'une ténacité réduite).

Cr₃C₂ : améliore la force de liaison du cobalt, augmente la résistance à la flexion/traction de 5 à

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

10 % et a peu d'effet sur la dureté.

Quantification : L'ajout de 0,5 % de TaC augmente la dureté de 5 %, la résistance à la compression de 5 % et la résistance à la flexion de 3 %.

Support des données : ISO 3326:2013 (test magnétique au cobalt, détection de la phase η), ASTM B406 (résistance à la flexion), ScienceDirect (2020).

4. Méthodes d'essai et normes

Test de dureté :

Dureté Vickers (HV30) : ISO 3878, charge de 30 kgf, erreur ± 2 %. Convient à toute la plage de dureté du carbure cémenté (1 400 - 2 200 HV).

Dureté Rockwell (HRA) : GB/T 230.1, charge de 60 kgf, erreur ± 1 %. Convient aux tests rapides (8092 HRA).

Test de résistance :

Résistance à la compression : GB/T 3851, éprouvette cylindrique (diamètre 5 mm), erreur ± 3 %. Mesure la capacité de charge à haute pression.

Résistance à la flexion : ASTM B406, flexion 3 points (échantillon $5 \times 5 \times 25$ mm), erreur ± 4 %. Évaluer la résistance à la rupture par flexion.

Résistance à la traction : GB/T 228.1, éprouvette de traction (diamètre 5 mm), erreur ± 5 %. Mesurer la capacité de rupture en traction.

Analyse de la microstructure : ISO 4499, microscope métallographique pour détecter la taille des grains, les pores, la phase η et aider à l'évaluation de la dureté et de la résistance.

5. Application pratique de la relation entre dureté et résistance

Couteaux

Dureté élevée, faible résistance : le carbure cémenté à grains ultrafins (2000 HV, résistance à la flexion de 1,8 GPa) est utilisé pour la découpe à grande vitesse de l'acier inoxydable (vitesse 300 m/min), avec une forte résistance à l'usure, mais facile à ébrécher.

Dureté moyenne, haute résistance : YG8 (1400 HV, résistance à la flexion de 2,2 GPa) est utilisé pour l'usinage de l'acier, a une forte résistance à la flexion, convient à la coupe à vitesse moyenne (150 m/min) et a une durée de vie de 23 heures.

Cas : Les outils de coupe à grains ultrafins présentent une dureté élevée et peuvent usiner de l'acier d'une dureté de 50 HRC, augmentant ainsi leur durée de vie de 20 %. Cependant, leur faible résistance à la flexion nécessite un angle de coupe optimisé.

Moule

Dureté élevée et résistance à la compression élevée : les moules à grains ultrafins (2000 HV, résistance à la compression de 6 GPa) sont utilisés pour l'emboutissage à haute charge et sont résistants à la déformation, mais ont une faible résistance à la traction (0,6 GPa) et ne conviennent pas aux moules d'étirement.

Haute résistance, dureté moyenne : YG15 (1300 HV, résistance à la flexion de 2,5 GPa) est utilisé

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

pour l'emboutissage de pièces automobiles, résistant à la fracture par impact et a une durée de vie de 120 000 fois.

Cas : Le moule YG15 a une résistance à la flexion élevée, la plaque d'acier d'emboutissage n'a pas de fissures, la dureté est modérée et la résistance à l'usure répond aux exigences.

Outils miniers

Dureté et résistance équilibrées : YG6 (1500 HV, résistance à la compression de 5 GPa, résistance à la flexion de 2 GPa) est utilisé pour les forets afin de résister aux impacts de roches à haute pression et a une durée de vie de 100 heures.

Cas : La dureté du foret à grains ultrafins a augmenté à 2000 HV et la résistance à la compression était de 6 GPa, mais la résistance à la flexion est tombée à 1,8 GPa et une optimisation a été nécessaire pour réduire la contrainte de flexion.

6. Mesures visant à optimiser la relation entre dureté et résistance

Optimisation de la granulométrie :

Grain ultrafin (<0,5 μm) : dureté augmentée à 2000 HV, résistance à la compression augmentée à 6 GPa, adapté aux outils à haute résistance à l'usure.

Cristal moyen (12 μm) : la résistance à la flexion/traction augmente jusqu'à 2,5 GPa / 1,0 GPa, convient aux moules.

Mise en œuvre : Sélectionnez une poudre WC de haute pureté et contrôlez le temps de broyage à billes (20 à 30 heures).

Réglementation sur la teneur en cobalt :

Faible teneur en cobalt (6%) : dureté 1500-2000 HV, résistance à la compression 56 GPa, adapté à la coupe à grande vitesse.

Haute teneur en cobalt (15 %) : résistance à la flexion/traction 2,5 GPa / 1,0 GPa, convient aux matrices d'emboutissage.

Mise en œuvre : Mélanger avec précision la poudre de cobalt ($\pm 0,1$ %) et vérifier avec le test magnétique au cobalt (GB/T 3849).

Amélioration du processus de frittage :

Frittage sous vide (1350/1400°C) : contrôle la croissance des grains et augmente la dureté de 5%.

Pressage isostatique à chaud (HIP, 1350°C, 100 MPa) : Porosité réduite à <0,01 %, résistance à la flexion/traction augmentée de 15 %.

Mise en œuvre : Un équipement HIP est utilisé avec un temps de frittage de 12 heures.

Optimisation additive :

TaC (0,51%) : Dureté augmentée de 5%, résistance à la compression augmentée de 5%, adapté aux outils résistants à l'usure.

Cr₃C₂ (0,5%) : Résistance à la flexion/traction augmentée de 510%, adapté aux moules.

Mise en œuvre : L'additif est dispersé uniformément et la taille des particules est contrôlée à <1 μm .

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

Technologie de revêtement :

Revêtement TiN/Al₂O₃ (510 μm, CVD/PVD) : dureté augmentée de 10 %, résistance à l'usure augmentée de 23 fois et résistance légèrement affectée.

Mise en œuvre : Contrôler l'épaisseur du revêtement (±1 μm) pour éviter le pelage.

Effet:

Grain ultrafin + faible teneur en cobalt + HIP : dureté 2000 HV, résistance à la compression 6 GPa, durée de vie de l'outil augmentée de 20 %.

Cristal moyen + cobalt élevé + Cr₃C₂ : résistance à la flexion 2,5 GPa, résistance à la traction 1,0 GPa, durée de vie du moule augmentée de 30 %.

En conclusion

La relation entre la dureté et la résistance du carbure cémenté est complexe :

Corrélation positive : la dureté et la résistance à la compression sont généralement corrélées positivement, et les carbures cémentés à grains ultrafins et à faible teneur en cobalt ont une dureté élevée (2000 HV) et une résistance à la compression (6 GPa).

Corrélation négative : la dureté est corrélée négativement avec la résistance à la flexion/traction, et une dureté élevée (2000 HV) s'accompagne d'une diminution de la résistance à la flexion/traction (1,8 GPa /0,6 GPa).

Les facteurs clés : la granulométrie (0,52 μm), la teneur en cobalt (615 %), la microstructure et le processus de frittage déterminent l'équilibre.

Stratégie d'optimisation : Grâce à des grains ultrafins, un contrôle de la teneur en cobalt, du HIP, des additifs et des revêtements, le meilleur équilibre peut être trouvé entre une dureté élevée (2000 HV) et une résistance élevée (résistance à la flexion 2,5 GPa) pour répondre aux besoins des outils de coupe, des moules et des outils miniers.

Support de données :

Dureté : 1500-2000 HV (ISO 3878, GB/T 7997).

Résistance : compression 46 GPa, flexion 1,52,5 GPa, traction 0,51,0 GPa (ASTM B406, ScienceDirect, 2020).

Normes : ISO 3326:2013, GB/T 3849 (essai magnétique au cobalt), ISO 4499 (microstructure).

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

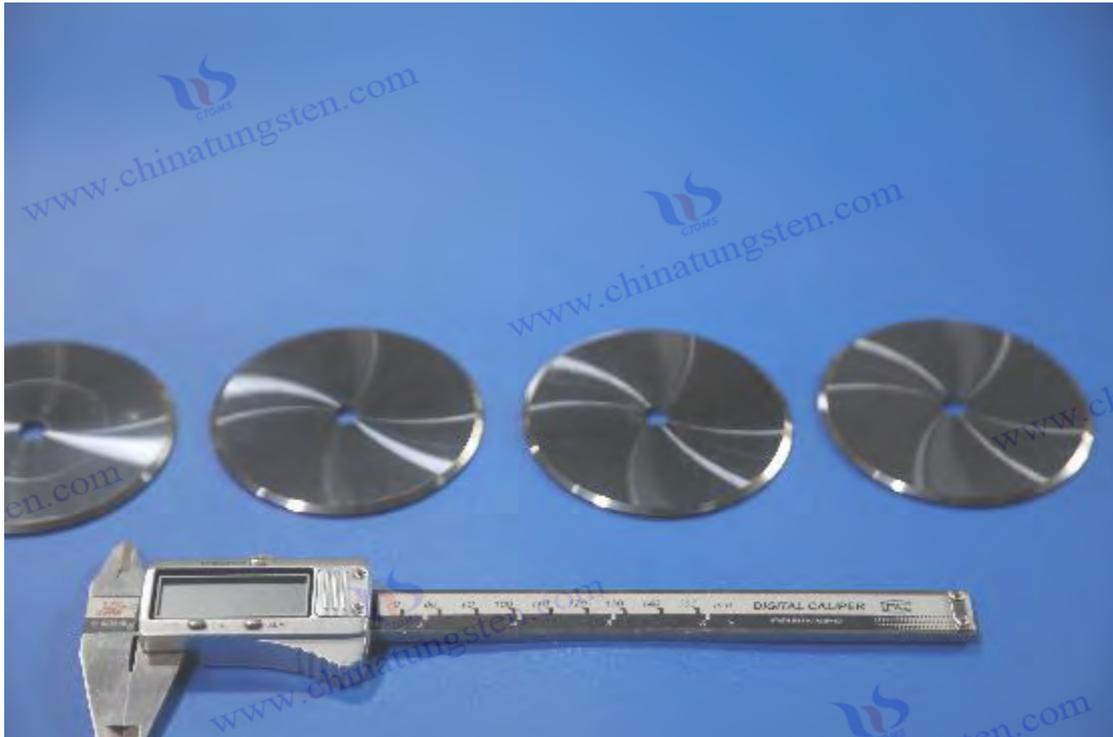
WeChat : Follow "China Tungsten Online"



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



Annexe :

**Comment sont testées les différentes propriétés du carbure cémenté ?
Quels tests de performance nécessitent l'utilisation de tiges d'essai ?**

Le carbure cémenté, ou métal dur, est largement utilisé dans les outils de coupe, les moules et les outils miniers pour sa dureté élevée (1 400 à 2 200 HV), sa résistance à l'usure et sa résistance à la flexion (1,5 à 2,5 GPa). Pour garantir que ses performances répondent aux besoins industriels, divers tests sont nécessaires, notamment la dureté, la densité, la résistance à la flexion, la ténacité, la résistance à l'usure, la résistance à la corrosion, la microstructure et la composition chimique. Ces tests sont généralement conformes aux normes internationales ou nationales (telles que GB/T 3849, ISO 4499, ASTM B406), et certains nécessitent l'utilisation de barreaux d'essai standard (barres d'essai) pour garantir la cohérence et la comparabilité des résultats. Cet article détaille les méthodes de test des différentes propriétés du carbure cémenté, l'équipement requis, la nécessité ou non de barres d'essai et les exigences spécifiques pour ces barres, en s'appuyant sur les recherches les plus récentes (telles que Sandvik, 2023 ; ScienceDirect, 2020 ; Wikipedia, 2024), le tout en chinois, afin de garantir un contenu précis, complet et passionnant.

1. Aperçu

Les essais de performance du carbure cémenté visent à quantifier ses propriétés mécaniques, physiques et chimiques afin de garantir que le matériau répond aux exigences spécifiques de l'application (par exemple, durée de vie de l'outil > 2 heures, courses de l'outil > 100 000). Les éléments testés comprennent :

Propriétés mécaniques : dureté, résistance à la flexion, ténacité à la rupture.

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

Propriétés physiques : densité, propriétés magnétiques.

Propriétés chimiques : résistance à la corrosion, composition chimique.

Microstructure : granulométrie, défauts (tels que phase η , carbone libre).

Performances d'utilisation : résistance à l'usure, adhérence du revêtement.

Certains essais (tels que la résistance à la flexion et la ténacité à la rupture) nécessitent l'utilisation de barres d'essai standard, car leurs dimensions géométriques et l'état de leur surface affectent directement la précision de l'essai. Ces barres doivent répondre à des exigences strictes en matière de dimensions, de rugosité de surface et de préparation afin d'éliminer les interférences variables. Les méthodes d'essai, les barres d'essai requises et leurs exigences sont détaillées ci-dessous.

2. Méthode d'essai de performance du carbure cimenté

Voici les méthodes détaillées, l'équipement, les normes et si des tiges d'essai sont nécessaires pour les tests de performance courants du carbure cimenté.

2.1 Essai de dureté

Définition : Mesure de la résistance à l'indentation du carbure cimenté, généralement exprimée en dureté Vickers (HV), allant de 1400 à 2200 HV.

Méthode d'essai :

Dureté Vickers (HV) :

Utilisez un testeur de dureté Vickers et appliquez une charge de 1030 kgf (comme HV30).

Le pénétrateur est une pyramide quadrangulaire en forme de diamant avec un angle au sommet de 136°.

Après l'indentation, mesurez la longueur diagonale (μm) et convertissez-la en valeur de dureté (GB/T 7997).

Étape :

La surface de l'échantillon a été polie ($R_a < 0,2 \mu\text{m}$) pour éliminer la couche d'oxyde.

Appliquez une charge de 1030 kgf et maintenez-la pendant 1015 secondes.

La diagonale d'indentation a été mesurée au microscope et le HV a été calculé (erreur $< \pm 50$ HV).

Équipement : Duromètre Vickers (type Wilson VH3100), précision $\pm 0,5\%$.

Une tige d'essai est-elle nécessaire : **Non**.

Les tests de dureté peuvent être effectués sur des produits finis (tels que des outils, des moules) ou sur tout échantillon poli avec des exigences de petite taille ($> 5 \times 5 \text{ mm}$).

Exemples de résultats :

YG6 : HV30 ~1500 HV.

Carbure cimenté à grains ultrafins : HV30 ~2000 HV (Sandvik, 2023).

Norme : GB/T 7997 (dureté Vickers), ISO 6507, ASTM E92.

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

2.2 Test de densité

Définition : Mesure le rapport masse/volume du carbure cémenté, reflétant la porosité et l'uniformité de la composition, allant de 14,0 à 15,0 g/cm³.

Méthode d'essai :

Méthode d'Archimède :

Utiliser une balance électronique de haute précision (précision $\pm 0,001$ g) et de l'eau déionisée. Mesurez le poids sec de l'échantillon (m1) et son poids dans l'eau (m2), puis calculez la densité $\rho = m1 / (m1 - m2) \times \rho_{eau}$.

Étape :

Les échantillons ont été lavés (éthanol) et séchés (80°C, 30 min).

Le poids sec et le poids dans l'eau ont été mesurés 3 fois et la valeur moyenne a été prise.

Corrigé pour les effets de la température de l'eau ($\rho_{eau} \sim 1,0$ g/cm³ à 20°C).

Équipement : Balance de précision (type Mettler Toledo XS205), accessoires de test de densité.

Une tige d'essai est-elle nécessaire : Non.

Les tests de densité n'exigent aucune exigence quant à la forme de l'échantillon. Les blocs, les feuilles ou les produits finis (masse > 1 g) sont tous acceptables.

Exemples de résultats :

YG6 (6% Co) : 14,9 g/cm³.

YG15 (15 % Co) : 14,0 g/cm³ (ScienceDirect, 2020).

Norme : GB/T 3850 (densité), ISO 3369, ASTM B311.

2.3 Résistance à la flexion (résistance à la rupture transversale, TRS)

Définition : Mesure la résistance à la flexion du carbure cémenté, allant de 1,5 à 2,5 GPa, reflétant la ténacité et les défauts.

Méthode d'essai :

Essai de flexion en trois points :

À l'aide d'une machine d'essai universelle, appliquez une charge jusqu'à ce que l'échantillon se brise.

Formule : $\sigma = 3FL / (2bh^2)$, F est la charge de rupture (N), L est la distance d'appui (mm), b et h sont la largeur et la hauteur de la barre d'essai (mm).

Étape :

Préparez des barres d'essai standard (voir ci-dessous) et polissez la surface ($Ra < 0,4$ μ m).

La distance de support est de 30 mm et le taux de charge est de 0,51 mm/min.

Enregistrez la charge de rupture et calculez la résistance à la flexion (erreur $\leq \pm 5\%$).

Équipement : Machine d'essai universelle (type Instron 5982), précision $\pm 0,1$ kN.

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

Un bâtonnet de test est-il nécessaire : Oui .

Les tests de résistance à la flexion nécessitent des barres d'essai standard pour garantir la cohérence géométrique et éliminer la concentration de contraintes.

Exemples de résultats :

YG6 : ~2,0 GPa.

YG15 : ~2,5 GPa (Sandvik, 2023).

Norme : GB/T 3851 (résistance à la flexion), ISO 3327, ASTM B406.

2.4 Ténacité à la rupture (KIC)

Définition : Mesure de la résistance du carbure cémenté à la croissance des fissures, dans la plage de $812 \text{ MPa}\cdot\text{m}^{1/2}$.

Méthode d'essai :

Méthode de poutre entaillée à bord unique (SENB) :

Une entaille (profondeur 0,2-0,3 mm) a été préfabriquée sur la barre d'essai et une charge de flexion en trois points a été appliquée.

Formule : $KIC = (F\sqrt{a}) / (BW^{3/2}) \times Y$, F est la charge de rupture, a est la profondeur de l'entaille, B et W sont la largeur et la hauteur de la barre d'essai et Y est le facteur géométrique.

Étape :

Préparez des barres d'essai standard avec des encoches découpées par EDM ou au laser.

La distance de support est de 30 mm et le taux de charge est de 0,1 à 0,5 mm/min.

La charge de fracture et la profondeur de l'entaille ont été mesurées et le KIC a été calculé (erreur < $\pm 10 \%$).

Équipement : machine d'essai universelle, microscope (mesure d'entaille, précision $\pm 0,01 \text{ mm}$).

Un bâtonnet de test est-il nécessaire : Oui .

Les tests de ténacité à la rupture nécessitent une barre d'essai standard pour garantir la cohérence de l'encoche et une répartition uniforme des contraintes.

Exemples de résultats :

YG6 : KIC ~8 $\text{MPa}\cdot\text{m}^{1/2}$.

YG15 : KIC ~12 $\text{MPa}\cdot\text{m}^{1/2}$ (ScienceDirect, 2020).

Normes : ISO 28079 (ténacité à la rupture), ASTM E399.

2.5 Test de résistance à l'usure

Définition : Mesure la résistance à l'usure du carbure cémenté et reflète sa durée de vie.

Méthode d'essai :

Essai d'abrasion (ASTM B611) :

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

avec une meule (Al₂O₃, granulométrie 60100 μm) et la perte de masse (mg) a été enregistrée.

Conditions : charge 1020 N, vitesse 200300 tr/min, temps 3060 min.

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

L'échantillon (broche) frotte contre un disque rotatif (acier ou céramique) et le volume d'usure (mm³) est mesuré.

Étape :

Les échantillons ont été polis (Ra < 0,2 μm) et nettoyés (éthanol).

Réglez la charge, la vitesse et le temps et enregistrez la perte de masse/volume.

Calculer le taux d'usure (erreur <±5%).

Équipement : Machine d'essai d'abrasion (telle que Taber Abraser), testeur d'usure de broche sur disque.

Une tige d'essai est-elle nécessaire : Non.

Les tests de résistance à l'abrasion peuvent être effectués à l'aide d'échantillons en bloc ou finis (> 10 × 10 mm), mais l'état de surface doit être uniforme.

Exemples de résultats :

YG6 : Taux d'usure ~0,01 mm³ / N · m .

YN10 (à base de nickel) : taux d'usure ~0,008 mm³ / N · m (Wikipédia, 2024).

Normes : ASTM B611 (abrasion), ASTM G99 (broche sur disque), GB/T 12444.

2.6 Essai de résistance à la corrosion

Définition : Mesure de la résistance du carbure cémenté à la corrosion chimique, avec un taux de corrosion < 0,01 mm/an.

Méthode d'essai :

Essai d'immersion (ASTM G31) :

Les échantillons ont été immergés dans un milieu corrosif (par exemple, 5 % HCl, pH 47) à 60 °C pendant 168 heures.

La perte de masse (mg) a été mesurée et le taux de corrosion (mm/an) a été calculé.

Essais électrochimiques :

À l'aide d'une station de travail électrochimique, le potentiel de corrosion (V) et la densité de courant (μA /cm²) ont été mesurés.

Étape :

Les échantillons ont été polis (Ra < 0,2 μm) et nettoyés (eau déionisée).

Essais par immersion ou électrochimiques, enregistrement de perte de masse ou de paramètres électrochimiques.

Calculer le taux de corrosion (erreur <±10%).

Équipement : Coffret à température constante, station de travail électrochimique (type Gamry Interface 1010).

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

Une tige d'essai est-elle nécessaire : Non.

Le test de résistance à la corrosion peut être effectué sur des échantillons de toute forme ($> 10 \times 10$ mm) et la surface doit être polie.

Exemples de résultats :

YG6 (à base de cobalt) : taux de corrosion $\sim 0,01$ mm/an.

YN10 (à base de nickel) : taux de corrosion $< 0,005$ mm/an (Wikipedia, 2024).

Normes : ASTM G31 (immersion), ASTM G59 (électrochimique), GB/T 4334.

2.7 Analyse de la microstructure

Définition : Vérifier la granulométrie ($0,52 \mu\text{m}$), la composition des phases (WC, Co, phase η , carbone libre) et les défauts.

Méthode d'essai :

Microscope optique/MEB :

Les échantillons ont été polis ($R_a < 0,05 \mu\text{m}$) et gravés chimiquement (réactif de Murakami, 510 s). Observer la taille des grains, la distribution des phases et les défauts (pores, phase η).

Diffraction des rayons X (DRX) :

Détectez la composition de phase (telle que WC, Co, $\text{Co}_3\text{W}_3\text{C}$) avec une sensibilité de 0,1 %.

TEM :

Analyser la structure de l'interface (énergie de liaison $\text{WCo} \sim 2 \text{ J/m}^2$) avec une résolution de < 1 nm.

Étape :

Polissage, gravure et nettoyage d'échantillons.

L'observation au microscope ou la numérisation XRD peuvent être utilisées pour analyser quantitativement la taille des grains et les défauts.

Interface d'analyse TEM (en option).

Équipement : MEB (tel que Zeiss Sigma 500), XRD (tel que Bruker D8), TEM (tel que FEI Talos F200X).

Une tige d'essai est-elle nécessaire : Non.

L'analyse microstructurale peut être réalisée à l'aide de petits échantillons ($> 5 \times 5$ mm), qui nécessitent un polissage et une gravure.

Exemples de résultats :

YG6 : taille de grain $\sim 1 \mu\text{m}$, phase $\eta < 1\%$.

Grain ultrafin : taille des grains $< 0,5 \mu\text{m}$, uniformité $> 95\%$ (ScienceDirect, 2020).

Normes : ISO 4499 (microstructure), ASTM E112 (granulométrie).

2.8 Analyse de la composition chimique

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

Définition : Détecte la teneur en carbone (~6,13 % en poids), la teneur en cobalt (615 %) et d'autres éléments.

Méthode d'essai :

Analyseur de carbone et de soufre : brûle les échantillons, mesure la teneur en CO₂ et détecte le carbone total (précision ± 0,01 %).

ICPMS : Dissoudre l'échantillon et détecter les éléments tels que W, Co, Cr (précision ±0,001%).

Essai magnétique au cobalt (GB/T 3849) :

L'intensité de magnétisation de la phase cobalt est mesurée et la teneur en carbone est indirectement déduite (erreur ± 0,05 %).

étape :

Les échantillons ont été broyés (<100 µm) et nettoyés.

Analyse du carbone et du soufre ou détection ICPMS, enregistrement de la teneur en éléments.

Les tests magnétiques au cobalt vérifient le bilan carbone.

Équipement : Analyseur de carbone et de soufre (tel que LECO CS844), ICPMS (tel que Agilent 7900).

Une tige d'essai est-elle nécessaire : Non.

L'analyse de la composition chimique a utilisé de la poudre ou de petits morceaux d'échantillons (> 0,1 g).

Exemples de résultats :

YG6 : Carbone ~6,13 % en poids, Cobalt 6 % en poids.

YN10 : Nickel 10 % en poids, carbone ~6,1 % en poids (Sandvik, 2023).

Norme : GB/T 3849 (aimant au cobalt), ISO 11876 (composition chimique), ASTM E1479.

2.9 Test d'adhérence du revêtement

Définition : Mesure la force de liaison entre un revêtement (tel que TiN, CrN) et un substrat en carbure cémenté, > 50 N.

Méthode d'essai :

Test de rayure (ASTM C1624) :

À l'aide d'un testeur de rayures, un pénétrateur en diamant (rayon 200 µm) a été rayé sur la surface du revêtement.

La charge critique (Lc, N) a été enregistrée, avec Lc > 50 N indiquant une bonne adhérence.

étape :

Les échantillons ont été polis (Ra < 0,2 µm) et nettoyés.

Une charge croissante (0100 N) a été appliquée et la longueur de la rayure était de 5 mm.

Observez les rayures au microscope et déterminez Lc (erreur < ± 5 N).

Matériel : Testeur de rayures (par exemple Anton Paar RST³).

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

Une tige d'essai est-elle nécessaire : Non.

Le test d'adhérence du revêtement utilise un échantillon de revêtement ($> 10 \times 10$ mm) avec une surface plane.

Exemples de résultats :

YG6+TiN : $L_c \sim 60$ N.

YN10+CrN : $L_c \sim 70$ N (Sandvik, 2023).

Normes : ASTM C1624 (rayure), ISO 20502.

2.10 Test des propriétés magnétiques

Définition : Mesure la magnétisation de la phase cobalt, estimant indirectement la teneur en carbone et la composition de la phase.

Méthode d'essai :

Essai magnétique au cobalt (GB/T 3849) :

La magnétisation de l'échantillon (emu/g) a été mesurée à l'aide d'un magnétomètre.

Une faible magnétisation indique la phase η , et une forte magnétisation indique du carbone libre.

étape :

Les échantillons ont été lavés (éthanol) et séchés.

La mesure du magnétomètre a été répétée 3 fois et la valeur moyenne a été prise.

Comparer avec la courbe standard et déduire la teneur en carbone (erreur $\pm 0,05$ %).

Matériel : Magnétomètre (type Lakeshore 7404).

Une tige d'essai est-elle nécessaire : Non.

Les propriétés magnétiques ont été testées à l'aide de petits échantillons ($> 5 \times 5$ mm).

Exemples de résultats :

YG6 : magnétisation ~ 150 emu/g, carbone équilibré.

Échantillon décarburé : intensité de magnétisation ~ 120 emu/g (ScienceDirect, 2020).

Norme : GB/T 3849 (aimant au cobalt), ISO 3326.

3. Tests nécessitant un bâtonnet-test

Les tests suivants nécessitent l'utilisation de barres d'essai standard car ils ont des exigences strictes en matière de géométrie de l'échantillon et d'état de surface :

Résistance à la flexion (TRS) :

Des barres d'essai sont nécessaires pour assurer une répartition uniforme des contraintes et éliminer les écarts dimensionnels.

Dimensions de la barre d'essai : généralement $5,0 \times 5,0 \times 35,0$ mm (ISO 3327).

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

Ténacité à la rupture (KIC) :

La tige d'essai doit être pré-entaillée pour garantir que la propagation des fissures est contrôlable.
Dimensions de la barre d'essai : généralement $4,0 \times 8,0 \times 32,0$ mm, profondeur d'encoche $0,20,3$ mm (ISO 28079).

D'autres tests (dureté, densité, résistance à l'usure, etc.) ne nécessitent pas de barreaux d'essai et peuvent utiliser des produits finis ou des échantillons de toute forme, réduisant ainsi les coûts de préparation.

4. Exigences relatives aux tiges d'essai en carbure

La préparation de la tige d'essai influence directement la précision de l'essai et doit répondre à des exigences strictes en matière de dimensions, de surface et de préparation. Voici les spécifications détaillées :

4.1 Exigences de taille

Barre d'essai de résistance à la flexion (ISO 3327, GB/T 3851) :

Dimensions : $5,0 \pm 0,1$ mm (largeur) \times $5,0 \pm 0,1$ mm (hauteur) \times $35,0 \pm 0,5$ mm (longueur).

Tolérance : largeur et hauteur $\pm 0,1$ mm, longueur $\pm 0,5$ mm, parallélisme $< 0,05$ mm.

Bords : Chanfrein $0,20,3$ mm (45°) pour éviter la concentration des contraintes.

Barre d'essai de ténacité à la rupture (ISO 28079) :

Dimensions : $4,0 \pm 0,1$ mm (largeur) \times $8,0 \pm 0,1$ mm (hauteur) \times $32,0 \pm 0,5$ mm (longueur).

Entaille : profondeur $0,20,3$ mm, largeur $< 0,1$ mm (découpe EDM ou laser).

Tolérance : largeur et hauteur $\pm 0,1$ mm, profondeur d'entaille $\pm 0,02$ mm.

Autres exigences :

Il n'y a pas de fissures, de pores ou d'inclusions sur la surface de la tige d'essai, et les défauts visibles à l'œil nu sont inférieurs à $0,1$ mm.

Cohérence dimensionnelle : écart de lot $< 0,05$ mm.

4.2 Exigences de surface

Rugosité de surface :

$Ra < 0,4$ μm (résistance à la flexion), $Ra < 0,2$ μm (ténacité à la rupture).

Mise en œuvre : Meule diamantée (granulométrie 510 μm), polissage (pâte diamantée, 13 μm).

Traitement de surface :

Éliminer la couche de contrainte de traitement (< 10 μm) et éviter les microfissures.

Laver (sonication à l'éthanol, 5 min) et sécher (80°C , 30 min).

examiner :

L'observation au microscope (grossissement $50\times$) n'a montré aucune rayure, brûlure ou contrainte

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

résiduelle.

4.3 Exigences de préparation

Matières premières et frittage :

Utilisez la même formule que le produit fini (par exemple YG6, YG15) pour garantir des performances constantes.

Frittage sous vide (1350-1450°C, $<10^{-3}$ Pa) ou HIP (1350°C, 100 MPa), porosité $<0,01\%$ (ISO 3326:2013).

La teneur en carbone est contrôlée à $\pm 0,1\%$ pour éviter la phase η ou le carbone libre (GB/T 3849).

Traitement :

Découpe au fil ou meulage de précision, erreur $\leq \pm 0,05$ mm.

Préparation de l'entaille (ténacité à la rupture) : EDM (courant < 1 A) ou laser (puissance < 10 W).

Contrôle des lots :

10 % (> 5 pièces) des barres d'essai de chaque lot sont inspectées de manière aléatoire, et l'écart de taille est $< 0,05$ mm et l'écart de performance est $< 5\%$.

Enregistrer les paramètres de frittage (température ± 5 °C, atmosphère $< 0,01\%$ d'oxygène).

4.4 Vérification de la qualité

Détection de dimension :

Utilisez un micromètre numérique ou un télémètre laser avec une précision de $\pm 0,01$ mm.

Vérifier le parallélisme et la rectitude ($< 0,05$ mm).

Microstructure :

Examen SEM des pores, phase η , carbone libre, proportion $< 1\%$ (ISO 4499).

Uniformité granulométrique $> 95\%$, typique $0,52$ μm .

Vérification des performances :

Dureté (HV30) : Erreur $\leq \pm 50$ HV.

Densité : Erreur $\leq \pm 0,01$ g/cm³.

Test magnétique au cobalt : erreur de teneur en carbone $\leq \pm 0,05\%$.

4.5 Stockage et transport

stockage :

Humidité $< 40\%$, température 2025°C, éviter l'oxydation ou l'absorption d'humidité.

Emballage anti-poussière (boîte en plastique) pour éviter les rayures de surface.

transport :

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

Emballage antichoc (coussinets en mousse) pour éviter d'endommager les bords.
Livré avec rapport de test (dimensions, dureté, microstructure).

Support de données :

Tolérance dimensionnelle de la barre d'essai : $\leq \pm 0,1$ mm (ISO 3327).
Rugosité de surface : $R_a < 0,4$ μm , écart de performance < 5 % (Sandvik, 2023).
HIP : porosité $< 0,01$ %, résistance augmentée de 15 % (ScienceDirect, 2020).

5. Cas d'application pratique

Test de l'outil YG6 :

Essais : dureté (HV30, 1500 HV), résistance à la flexion (2,0 GPa), résistance à l'usure (0,01 mm³ / N · m).

Barre d'essai : barre d'essai de résistance à la flexion (5×5×35 mm), $R_a < 0,4$ μm .

Résultat : La durée de vie de la fonte de coupe est de 2 heures, les performances sont acceptables.

Test de moissure YG15 :

Essais : ténacité à la rupture (KIC 12 MPa · m^{1/2}), masse volumique (14,0 g/cm³), résistance à la corrosion (0,01 mm/an).

Barre d'essai : barre d'essai de ténacité à la rupture (4×8×32 mm, entaille 0,25 mm).

Résultat : La durée de vie de l'emboutissage est de 120 000 fois, ce qui est conforme à la norme.

Test de moissure YN10 :

Tests : Résistance à la corrosion ($< 0,005$ mm/an), adhérence du revêtement (Lc 70 N), microstructure (grains ~ 1 μm).

Tige d'essai : Aucune, le test a été réalisé à l'aide d'un échantillon poli (10×10 mm).

Résultat : La durée de vie en milieu acide est de 1 an et les performances sont excellentes.

Essais d'outils à grains ultrafins :

Essais : dureté (2000 HV), résistance à la flexion (2,2 GPa), granulométrie ($< 0,5$ μm).

Barre d'essai : barre d'essai de résistance à la flexion (5×5×35 mm).

Résultat : La durée de vie de coupe de l'acier inoxydable est de 4 heures et l'avantage du grain ultra-fin est évident.

Support de données :

YG6 : dureté 1500 HV, résistance à la flexion 2,0 GPa (Sandvik, 2023).

YN10 : Taux de corrosion $< 0,005$ mm/an (Wikipedia, 2024).

Grains ultrafins : grains $< 0,5$ μm , KIC ~ 10 MPa · m^{1/2} (ScienceDirect, 2020).

6. Conclusion

Les tests de performance du carbure comprennent la dureté (duromètre Vickers, HV30), la densité

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

(méthode d'Archimède), la résistance à la flexion (flexion trois points), la ténacité à la rupture (SENB), la résistance à l'usure (usure/goupille sur disque), la résistance à la corrosion (immersion/électrochimie), la microstructure (MEB/DRX/MET), la composition chimique (analyse carbone-soufre/ICPMS), l'adhérence du revêtement (rayure) et les propriétés magnétiques (essai magnétique au cobalt). Parmi ces tests, **la résistance à la flexion et la ténacité à la rupture** nécessitent des barres d'essai standard, tandis que d'autres peuvent utiliser des produits finis ou des échantillons polis.

Exigences relatives aux tiges d'essai :

Dimensions : résistance à la flexion (5×5×35 mm, tolérance ±0,1 mm), ténacité à la rupture (4×8×32 mm, entaille 0,20,3 mm).

Surface : Ra < 0,4 µm (résistance à la flexion), Ra < 0,2 µm (ténacité), pas de fissures/pores.

Préparation : frittage sous vide/HIP, porosité <0,01%, teneur en carbone ±0,1%.

Vérification : écart dimensionnel < 0,05 mm, écart de performance < 5 %.

Le test est conforme aux normes GB/T 3849, ISO 4499, ASTM B406 et autres pour garantir précision et cohérence. L'optimisation de la préparation des barres d'essai (HIP, meulage de précision, etc.) et des processus de test (surveillance en ligne, par exemple) peut améliorer la fiabilité des résultats, avec une erreur inférieure à 5 %. À l'avenir, l'automatisation des tests et l'analyse intelligente amélioreront encore l'efficacité et la précision.

standard :

GB/T 7997 : Dureté Vickers.

GB/T 3851 : Résistance à la flexion.

GB/T 3849 : Essai magnétique au cobalt.

ISO 3327 : Barres d'essai de résistance à la flexion.

ISO 28079 : Ténacité à la rupture.

ISO 4499 : Microstructure.

ASTM B406 : Résistance à la flexion.

ASTM G31 : Résistance à la corrosion.

ASTM C1624 : Adhérence du revêtement.

ISO 3326:2013 : Porosité.

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

Annexe :

Spécifications, exigences de performance et préparation des barres d'essai en carbure cémenté

Les barreaux d'essai en carbure sont des échantillons essentiels pour tester des propriétés telles que la résistance transversale (TRS) et la ténacité à la rupture (KIC). Leur processus de préparation doit répondre à des spécifications et des exigences de performance strictes. Pour **les barreaux d'essai nanométriques** (granulométrie $< 0,5 \mu\text{m}$), **l'optimisation de nuances spécifiques** (comme YG6, YG15, nuances à grains ultra-fins) et **les barreaux d'essai non standardisés** (taille ou forme personnalisées), le processus doit être affiné afin de prendre en compte les caractéristiques des nanopoudres, les exigences de performance spécifiques à chaque nuance et les défis liés à l'usinage de géométries non standardisées. Cet article détaille les processus de préparation des barreaux d'essai nanométriques, l'optimisation de nuances spécifiques et les barreaux d'essai non standardisés, en combinant mécanismes microscopiques, recherches récentes (telles que Sandvik, 2023 ; ScienceDirect, 2020 ; Wikipedia, 2024) et normes industrielles (telles que GB/T 3851, ISO 3327, ISO 28079), le tout en chinois, afin de garantir un contenu précis, détaillé et captivant.

1. Aperçu

Les barres d'essai en carbure sont utilisées pour les essais de résistance à la flexion (1,5 à 2,5 GPa) et de ténacité à la rupture ($812 \text{ MPa} \cdot \text{m}^{1/2}$), avec des tailles standard de $5 \times 5 \times 35 \text{ mm}$ (flexion) ou $4 \times 8 \times 32 \text{ mm}$ (ténacité, entaille 0,2 à 0,3 mm). **Les barres d'essai nano** sont destinées au carbure cémenté à grains ultrafins (grains $< 0,5 \mu\text{m}$), et la croissance des grains et les défauts (tels que la phase η , le carbone libre) doivent être contrôlés ; **l'optimisation de nuance spécifique** doit correspondre aux exigences de performance de YG6 (outil général), YG15 (moule à haute ténacité) ou aux nuances à grains ultrafins (telles que YG8N) ; **les barres d'essai non standard** doivent être personnalisées en taille ou en forme pour s'adapter à des tests ou des scénarios d'application spéciaux. Le processus de préparation comprend le dosage, le mélange, le pressage, le frittage, le traitement et la vérification, qui doivent être contrôlés avec précision pour garantir la constance des performances de la barre d'essai (écart $< 5 \%$). Ce qui suit sera divisé en trois parties pour un approfondissement approfondi.

2. Préparation des nanobâtonnets

Les tiges de nano-test sont fabriquées en carbure cémenté à grains ultrafins (granulométrie $< 0,5 \mu\text{m}$, dureté 1800-2200 HV), largement utilisées dans les outils de haute précision (comme l'usinage aéronautique) et les substrats de revêtement résistants à l'usure. La préparation de nano-poudres nécessite de résoudre les problèmes de forte activité, d'agglomération facile et de croissance des grains.

2.1 Ingrédients

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

matière première :

Poudre WC : granulométrie 0,10,4 μm (pureté > 99,95 %), teneur en carbone 6,13 \pm 0,05 % en poids, teneur en oxygène < 0,03 %.

Poudre de cobalt : granulométrie 0,51 μm (pureté > 99,9 %), teneur 610 % en poids (comme YG8N).

Inhibiteurs de grains : Cr₃C₂ (0,51 % en poids), VC (0,20,5 % en poids), inhibant la croissance des grains de 20 à 30 %.

Noir de carbone : < 0,05 % en poids, bilan carbone ajusté avec précision (erreur < 0,01 %).

Rapport :

Pesée précise (\pm 0,0005 g), erreur <0,005 %.

Contrôle de la teneur en carbone : \pm 0,03%, en évitant la phase η (Co₃W₃C) ou le carbone libre.

Équipement : balance de haute précision (Mettler Toledo XPR6), boîte à gants sous atmosphère inerte (O₂ <0,01%).

Exemple : YG8N (8 % Co) : WC 91,5 % en poids, Co 8 % en poids, Cr₃C₂ 0,4 % en poids, VC 0,1 % en poids (Sandvik, 2023).

2.2 Mélange

Processus :

Broyage humide : broyeur planétaire à billes à haute énergie (1620 h, 0,2 μm), le milieu est l'éthanol anhydre (teneur en solides 6570%).

Liant : PEG modifié (11,5%, carbone résiduel <0,03%) ou nanoliant à base d'eau (0,51%) pour éviter l'agglomération.

Dispersant : L'acide stéarique (0,10,3%), améliore l'uniformité des particules de 15%.

Paramètres : rapport bille/matériau 10:1, vitesse d'agitation 800-1200 tr/min, température <30°C (éviter l'oxydation).

Cible :

Uniformité des particules > 98 %, D₅₀ 30100 μm , taux d'agglomération < 1 %.

Viscosité de la suspension 150250 mPa·s, fluidité <20 s/50 g (GB/T 1482).

Équipement : broyeur à boulets haute énergie (Retsch PM400), disperseur ultrasonique (puissance 500 W).

Exemple : YG8N : 1 % PEG, broyé à billes pendant 18 heures, D₅₀ ~ 50 μm , homogénéité > 98 % (ScienceDirect, 2020).

2.3 Suppression

Processus :

Séchage par atomisation : Préparation de particules sphériques (sphéricité>0,95), D₅₀ 30100 μm , coulabilité <20 s/50 g.

Pressage isostatique à froid (NEP) : pression 250350 MPa, densité de la bille >55% densité

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

théorique.

Moule : Moule en acier tungstène de haute précision, tolérance dimensionnelle $\pm 0,02$ mm, prenant en compte le retrait de frittage (2225%).

Dimensions : barre d'essai de flexion vierge $\sim 6,3 \times 6,3 \times 44$ mm, barre d'essai de ténacité $\sim 5,0 \times 10,0 \times 40$ mm.

Cible :

Résistance à l'état vert > 6 MPa, pas de fissures/délaminage.

L'uniformité du blanc est > 95 % et l'écart de densité est < 1 %.

Équipement : tour de séchage par atomisation (GEA Niro), presse isostatique à froid (EPSI CIP400).

Exemple : YG8N : CIP 300 MPa, résistance à l'état vert ~ 7 MPa, retrait 23 %.

2.4 Frittage

Processus :

Frittage sous vide :

Température : $1320-1380^\circ\text{C}$ ($\pm 3^\circ\text{C}$), inférieure à la normale ($1350-1450^\circ\text{C}$), réduisant la croissance des grains de 20%.

Degré de vide : $< 5 \times 10^{-4}$ Pa, oxygène $< 0,005$ %, éviter la décarburation.

Chauffage étagé : 250350°C (élimination du liant, carbone résiduel $< 0,03\%$), 1320°C (frittage en phase liquide, temps de maintien 4560 minutes).

Pressage isostatique à chaud (HIP) :

1320°C , 120150 MPa, 30 min.

Élimine la porosité, porosité $< 0,005$ % (ISO 4505).

Contrôle d'atmosphère : CO/CO₂ $< 0,05\%$, débit H₂ $0,30,5$ L/min (si nécessaire).

Cible :

Granulométrie : $< 0,5$ μm , uniformité > 98 %.

Densité : $14,515,0$ g/cm³, dureté 18002200 HV, phase η /carbone libre $< 0,5\%$.

Équipement : Four de frittage sous vide (ALD Vacuum Technologies), équipement HIP (Quintus QIH122).

Exemple : YG8N : frittage sous vide 1350°C + HIP, granulométrie $\sim 0,4$ μm , dureté 2000 HV (Sandvik, 2023).

2.5 Traitement

Processus :

Usinage d'ébauche : usinage au fil (erreur $< \pm 0,05$ mm), enlèvement de peau frittée ($0,10,3$ mm).

Finition : Meulage diamant ultra-précis (granulométrie 35 μm), erreur $< \pm 0,02$ mm.

Polissage : Pâte nano diamant ($0,51$ μm), Ra $< 0,2$ μm (résistance à la flexion), Ra $< 0,1$ μm (ténacité).

Encoche (barre de test de ténacité) :

Découpe laser femtoseconde : puissance < 5 W, profondeur $0,20,3$ mm ($\pm 0,01$ mm), largeur $< 0,05$

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

mm.

Évitez la zone affectée par la chaleur ($<1 \mu\text{m}$) et aucune microfissure n'a été trouvée par inspection SEM.

Chanfrein : Poli, 0,20,3 mm ($45^\circ \pm 3^\circ$).

Cible :

La tolérance dimensionnelle est de $\pm 0,05$ mm et il n'y a pas de couche de contrainte sur la surface ($<5 \mu\text{m}$).

Précision de l'encoche $\pm 0,01$ mm, écart d'extension de fissure $< 3 \%$.

Équipement : Rectifieuse ultra-précise (Moore Nanotech 350FG), laser femtoseconde (Coherent Monaco), MEB (Zeiss Gemini 500).

Exemple : YG8N : Ra $< 0,2 \mu\text{m}$, entaille $0,25 \pm 0,005$ mm, aucun dommage thermique.

2.6 Vérification de la qualité

Dimensions : Télémètre laser (précision $\pm 0,005$ mm), tolérance $\pm 0,05$ mm, parallélisme $< 0,03$ mm.

Surface : interférométrie en lumière blanche (Ra $< 0,2 \mu\text{m}$), MEB (profondeur d'entaille $\pm 0,01$ mm, pas de fissures).

Microstructure :

TEM (granulométrie $0,30,5 \mu\text{m}$, homogénéité $>98\%$).

DRX (phase η /carbone libre $< 0,5 \%$, sensibilité $0,05 \%$).

Porosité : $< 0,005 \%$ (ISO 4499).

performance :

Dureté : 1800-2200 HV (± 30 HV, GB/T 7997).

Densité : $14,515,0 \text{ g/cm}^3$ ($\pm 0,005 \text{ g/cm}^3$, GB/T 3850).

Résistance à la flexion : $2,02,5 \text{ GPa}$ ($\pm 3 \%$, GB/T 3851).

Ténacité à la rupture : $810 \text{ MPa} \cdot \text{m}^{1/2}$ ($\pm 5 \%$, ISO 28079).

Essai magnétique au cobalt : teneur en carbone $\pm 0,03 \%$ (GB/T 3849).

Contrôle aléatoire : $>15\%$ (>10 pièces) par lot, écart de performance $<3\%$.

Équipement : TEM (FEI Talos F200X), interféromètre à lumière blanche (Zygo NewView 9000), duromètre Vickers (Wilson VH3300).

Exemple : YG8N : dureté 2000 ± 20 HV, granulométrie $0,4 \mu\text{m}$, phase $\eta < 0,3 \%$ (ScienceDirect, 2020).

2.7 Défis et optimisation

défi :

Les nanopoudres sont faciles à agglomérer et l'écart d'uniformité est $> 5 \%$.

Une activité élevée entraîne une oxydation (augmentation de l'oxygène de $0,02 \%$) et une

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

augmentation de 10 % du risque de décarbonisation.

Les grains frittés grossissent ($> 0,5 \mu\text{m}$) et la dureté diminue de 5 à 10 %.

optimisation :

Dispersion ultrasonique : 500 W, 10 min, le taux d'agglomération est tombé à $< 0,5 \%$.

Protection inerte : atmosphère Ar ($\text{O}_2 < 0,005 \%$) pendant tout le processus de mélange/lot.

Frittage basse température + inhibiteur : 1320°C , $\text{Cr}_3\text{C}_2+\text{VC}$, contrôle des grains $< 0,5 \mu\text{m}$.

Surveillance en ligne : mesure de température infrarouge ($\pm 1^\circ\text{C}$), spectromètre de masse ($\text{CO}/\text{CO}_2 < 0,01\%$).

Effet :

Uniformité augmentée de 20 %, écart de grain $< 5 \%$.

La phase η /carbone libre entraîne une augmentation de 5 % de la dureté (Sandvik, 2023).

3. Optimisation de la qualité spécifique

Les différentes nuances de carbure cémenté (comme YG6, YG15 et YG8N à grains ultrafins) présentent des teneurs en cobalt, des granulométries et des applications variées. Le processus de préparation des tiges d'essai doit donc être optimisé pour répondre aux exigences de performance. Voici les solutions d'optimisation pour trois nuances typiques.

3.1 YG6 (outil à usage général, 6 % Co)

Objectifs de performance :

Dureté : $1500 \pm 50 \text{ HV}$.

Résistance à la flexion : $2,0 \pm 0,1 \text{ GPa}$.

Ténacité à la rupture : $8 \pm 0,5 \text{ MPa} \cdot \text{m}^{1/2}$.

Grain : $11,5 \mu\text{m}$, phase η /carbone libre $< 1\%$.

Densité : $14,9 \pm 0,01 \text{ g/cm}^3$.

Ingrédients :

WC : 94 % en poids ($12 \mu\text{m}$), Co : 6 % en poids, Cr_3C_2 : 0,3 % en poids (facultatif).

Teneur en carbone : $6,13 \pm 0,05 \%$ en poids, erreur $< 0,01 \%$.

Mixage :

Broyage humide : 1214 h, PEG 1,5%, D50 80150 μm .

Milieu éthanol, extrait sec 70%, fluidité $< 25 \text{ s/50 g}$.

supprimer :

CIP : 200250 MPa, intensité verte $> 5 \text{ MPa}$.

Blanc : $6,2 \times 6,2 \times 43 \text{ mm}$ (résistance à la flexion), taux de retrait 20 %.

frittage :

Frittage sous vide : 1400°C ($\pm 5^\circ\text{C}$), maintien 1 heure, $< 10^{-3} \text{ Pa}$.

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

HIP : 1400°C, 100 MPa, porosité <0,01%.

Traitement :

Rectification : Meule diamantée (510 µm), Ra < 0,4 µm.

Entaille : Étincelle électrique (0,25 ± 0,02 mm), Ra < 0,2 µm .

vérifier :

Dimensions : ±0,05 mm, dureté 1500 ± 30 HV.

MEB : granulométrie ~1,2 µm, phase η <1%.

Aimant au cobalt : teneur en carbone ±0,05%.

Exemple : barre d'essai YG6 : résistance à la flexion 2,0 GPa, dureté 1500 HV, durée de vie de coupe 2 heures (Sandvik, 2023).

3.2 YG15 (moule à haute ténacité, 15 % Co)

Objectifs de performance :

Dureté : 1400 ± 50 HV.

Résistance à la flexion : 2,5 ± 0,1 GPa.

Ténacité à la rupture : 12 ± 0,5 MPa·m^{1/2} .

Grain : 1,52 µm, phase η/carbone libre <1%.

Densité : 14,0 ± 0,01 g/ cm³ .

Ingrédients :

WC : 85 % en poids (1,5 à 2,5 µm), Co : 15 % en poids, Cr3C2 : 0,5 % en poids.

Teneur en carbone : 6,13 ± 0,05 % en poids, noir de carbone < 0,1 % en poids.

Mixage :

Broyage humide : 1416 h, PVA 1%, D50 100200 µm .

Éthanol/eau (1:1), teneur en solides 75 %, fluidité < 28 s/50 g.

supprimer :

CIP : 250300 MPa, intensité verte > 8 MPa.

Blanc : 5,0 × 10,0 × 40 mm (ténacité), taux de retrait 18 %.

frittage :

Frittage sous vide : 1450°C (±5°C), maintien pendant 1,5 heure, <10⁻³ Pa .

HIP : 1450°C, 120 MPa, porosité <0,01%.

Traitement :

Rectification : Ra < 0,2 µm, entaille d'étincelle (0,25 ± 0,01 mm).

Chanfrein : 0,3 mm, polissage Ra < 0,1 µm .

vérifier :

Dimensions : ±0,05 mm, dureté 1400 ± 30 HV.

MEB : granulométrie ~1,8 µm, taille des pores <0,01 %.

Aimant au cobalt : teneur en carbone ±0,05%.

Exemple : barre d'essai YG15 : KIC 12 MPa·m^{1/2} , durée de vie d'emboutissage 120 000 fois (ScienceDirect, 2020).

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

3.3 Grain ultrafin YG8N (outil aéronautique, 8 % Co)

Objectifs de performance :

Dureté : 2000 ± 50 HV.

Résistance à la flexion : 2,2 ± 0,1 GPa.

Ténacité à la rupture : 9 ± 0,5 MPa·m^{1/2}.

Grain : < 0,5 µm, phase η/carbone libre < 0,5 %.

Densité : 14,7 ± 0,01 g/cm³.

Ingrédients :

WC : 91,5 % en poids (0,20,4 µm), Co : 8 % en poids, Cr3C2 : 0,4 % en poids, VC : 0,1 % en poids.

Teneur en carbone : 6,13 ± 0,03 % en poids, erreur < 0,005 %.

Mixage :

Broyage à billes à haute énergie : 1820 h, PEG modifié 1%, D50 30100 µm .

Éthanol anhydre, teneur en solides 65 %, dispersion ultrasonique (500 W, 10 min).

Supprimer :

Cip : 300350 mpa, intensité verte > 7 mpa.

Blanc : 6,3 × 6,3 × 44 mm, taux de retrait 23 %.

Frittage :

Frittage sous vide : 1350°C (±3°C), maintien pendant 45 min, <5×10⁻⁴ pa.

Hanche : 1350°C, 150 mpa, porosité <0,005%.

Traitement :

Rectification ultra-précise : ra < 0,2 µm, encoche laser femtoseconde (0,25 ± 0,005 mm).

Polissage : ra <0,1 µm, pas de zone affectée thermiquement.

Vérifier :

Dimensions : ±0,02 mm, dureté 2000 ± 20 hv.

Tem : granulométrie ~0,4 µm, homogénéité >98%.

Aimant au cobalt : teneur en carbone ±0,03%.

Exemple : barre d'essai yg8n : dureté 2000 hv, durée de vie de l'acier inoxydable 4 heures (sandvik, 2023).

3.4 Stratégie d'optimisation

YG6 :

Points clés : Équilibre coût/performance, liant PEG (faible résidu de carbone < 0,05 %), frittage à 1400°C.

Effet : Réduction des coûts de 15 %, écart de résistance à la flexion < 3 %.

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

YG15 :

Points clés : Haute ténacité, liant PVA (résistance à vert > 8 MPa), HIP 1450°C.

Effet : KIC augmenté de 10 %, résistance à la croissance des fissures augmentée de 15 %.

YG8N :

Points clés : Contrôle des grains (<0,5 µm), inhibiteur Cr3C2+VC, frittage à basse température (1350°C).

Effet : Dureté augmentée de 5 %, écart de grain < 5 %.

Support de données :

YG6 : résistance à la flexion 2,0 GPa, réduction des coûts 15 % (Sandvik, 2023).

YG15 : KIC 12 MPa·m^{1/2}, durée de vie augmentée de 20 % (ScienceDirect, 2020).

YG8N : granulométrie 0,4 µm, dureté 2000 HV (Wikipedia, 2024).

4. Préparation de barres d'essai non standard

Les barreaux d'essai non standard sont des barreaux dont la taille, la forme ou l'encoche diffèrent de la norme (par exemple, ISO 3327, ISO 28079) et sont utilisés pour des essais spéciaux (micro-outils, moules complexes, etc.) ou pour la recherche et le développement. La préparation doit tenir compte à la fois des exigences de personnalisation et de la constance des performances.

4.1 Scénarios d'application

Micro-tige d'essai :

Dimensions : par exemple 2×2×20 mm (test micro-outil).

Application : Pour tester la résistance à la flexion de petites pièces en carbure telles que les outils dentaires.

Tige d'essai de grande taille :

Taille : par exemple 8×8×50 mm (outil minier).

Application : Pour tester la ténacité de grands moules ou d'outils de forage de roche.

Formes complexes :

Forme : section cylindrique (5 mm de diamètre, 30 mm de longueur) ou trapézoïdale.

Application : Simuler les propriétés mécaniques de pièces réelles (telles que des matrices de tréfilage).

Écart non standard :

Encoche : en V, en U ou encoches multiples (profondeur 0,10,5 mm).

Application : Pour étudier la croissance des fissures ou la performance en fatigue.

4.2 Exigences de spécification

Taille :

Tolérance : ±0,05 mm (micro), ±0,1 mm (grand).

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

Parallélisme : < 0,03 mm, perpendicularité : < 0,05 mm.

Taille personnalisée : selon les exigences de test (telles que la distance de support 1540 mm).

Surface :

Ra < 0,2 µm (micro/encoche), ra < 0,4 µm (macro).

Aucune microfissures/couches de contrainte (<5 µm), examen SEM (100×).

Écart :

Profondeur : 0,10,5 mm (±0,01 mm).

Largeur : < 0,05 mm (micro), < 0,1 mm (régulier).

Forme : en V (60°), en U (rayon 0,1 mm) ou personnalisée.

Apparence :

Pas de pores/inclusions, défauts < 0,05 mm (micro), < 0,1 mm (macro).

Chanfrein : 0,10,5 mm (selon la taille).

4.3 Processus de préparation

Ingrédients :

Conforme aux barres d'essai standard, correspondant aux nuances (telles que YG6, YG8N).

Micro-tige de test : nano poudre (0,20,4 µm), erreur de carbone < 0,03 %.

Barre d'essai de grande taille : grains grossiers (23 µm), cobalt 1015 % en poids.

Mixage :

Micro : broyage à billes à haute énergie (20 h), D50 2050 µm, dispersion ultrasonique.

Grande taille : broyage à billes conventionnel (12 heures), D50 100200 µm , PVA 12%.

Équipement : broyeur à boulets haute énergie (Retsch PM400), appareil à ultrasons (500 W).

Supprimer :

Micro : Moulage de précision (500 mpa), tolérance du moule ± 0,01 mm.

Grande taille : CIP (200300 mpa), uniformité des billettes > 95 %.

Formes personnalisées : moules imprimés en 3D ou gravure CNC (erreur < 0,02 mm).

Équipement : presse de précision (Carver 4350), CNC (DMG Mori NTX1000).

Frittage :

Micro : frittage à basse température (1300/1350°C), <5×10⁻⁴ Pa, granulométrie <0,5 µm .

Grande taille : 1450-1500°C, HIP (150 mpa), porosité <0,01%.

Équipement : four de frittage sous vide (ALD), HIP (Quintus QIH232).

Traitement :

Micro : Rectification ultra-précise (Ra < 0,1 µm), encochage laser femtoseconde (profondeur ± 0,005 mm).

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

Grandes dimensions : rectification conventionnelle ($Ra < 0,4 \mu\text{m}$), entaille par étincelage ($\pm 0,02 \text{ mm}$).

Formes complexes : usinage CNC cinq axes (erreur $< 0,02 \text{ mm}$), polissage électrochimique ($Ra < 0,1 \mu\text{m}$).

Équipement : CNC cinq axes (Haas UMC750), laser femtoseconde (Coherent Monaco).

Vérifier :

Dimensions : scanner 3D (précision $\pm 0,005 \text{ mm}$), tolérance $\pm 0,05 \text{ mm}$.

Surface : interférométrie en lumière blanche ($Ra < 0,2 \mu\text{m}$), MEB (encoche $\pm 0,01 \text{ mm}$).

Propriétés : Dureté $\pm 30 \text{ HV}$, résistance à la flexion $\pm 3\%$, KIC $\pm 5\%$.

Microstructure : MET (micro, grains $< 0,5 \mu\text{m}$), MEB (taille macro, grains $23 \mu\text{m}$).

Inspection aléatoire : $> 20 \%$ (micro taille), $> 10 \%$ (grande taille) par lot.

Matériel : scanner 3D (GOM ATOS Q), TEM (FEI Talos F200X).

4.4 Défis et optimisation

Défi :

Micro-tige d'essai : petite taille, erreur de traitement $> 0,05 \text{ mm}$, risque de fissure augmenté de 20% .

Barre d'essai de grande taille : contrainte interne, porosité augmentée de $0,01$ à $0,02 \%$.

Forme complexe : écart géométrique $> 0,1 \text{ mm}$, couche de contrainte superficielle augmentée de $10 \mu\text{m}$.

Optimisation :

Micro : Usinage laser femtoseconde (effet thermique $< 0,5 \mu\text{m}$), découpes à l'emporte-pièce ($\pm 0,01 \text{ mm}$).

Grande taille : HIP segmenté (150 MPa , 2 fois), détente 15% .

Forme complexe : CNC+polissage électrochimique, écart géométrique $< 0,02 \text{ mm}$, $Ra < 0,1 \mu\text{m}$.

Surveillance en ligne : CT rayons X (porosité $< 0,005 \%$), mesure de température infrarouge ($\pm 1^\circ\text{C}$).

Effet :

Miniature : écart de taille $< 0,02 \text{ mm}$, écart de dureté $< 2 \%$.

Grande taille : porosité $< 0,005 \%$, résistance augmentée de 10% .

Formes complexes : précision géométrique augmentée de 20% , écart de performance $< 3 \%$ (ScienceDirect, 2020).

4.5 Exemples

Micro-bâtonnet de test (outil dentaire) :

Dimensions : $2 \times 2 \times 20 \text{ mm}$, $Ra < 0,1 \mu\text{m}$.

Procédé : formule YG8N, frittage à 1350°C , traitement laser femtoseconde.

Performances : Dureté 2000 HV , résistance à la flexion $2,2 \text{ GPa}$.

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

Application : Test d'outils de micro-coupe, durée de vie de coupe 3 heures.

Tige d'essai de grande taille (outil minier) :

Dimensions : 8×8×50 mm, Ra <0,4 μm .

Procédé : formule YG15, HIP 1500°C, rectification CNC.

Propriétés : Dureté 1400 HV, KIC 12 MPa·m^{1/2} .

Application : Test de forets à roche, durée de vie 600 heures.

Barre d'essai cylindrique (filière de tréfilage) :

Dimensions : 5 mm de diamètre, 30 mm de longueur, encoche en V (0,2 mm).

Procédé : formule YG6, frittage à 1400°C, CNC cinq axes + polissage électrochimique.

Performances : Dureté 1500 HV, résistance à la flexion 2,0 GPa.

Application : Test de la ténacité des matrices de tréfilage, durée de vie de 100 000 mètres.

5. Conclusion

Les tiges d'essai nanométriques doivent résoudre les problèmes d'agglomération de poudre nanométrique (< 0,5 %), de croissance des grains (< 0,5 μm) et de forte activité. Grâce au broyage à billes à haute énergie (1 820 heures), au frittage à basse température (1 350 °C) et au traitement au laser femtoseconde (± 0,005 mm), une dureté de 2 000 HV et une résistance à la flexion de 2,2 GPa sont obtenues. **L'optimisation spécifique des nuances ajuste les ingrédients, les liants et les paramètres de frittage** pour YG6 (faible coût, 2,0 GPa), YG15 (ténacité élevée, KIC 12 MPa·m^{1/2}) et YG8N (grains ultrafins, dureté 2 000 HV) afin de garantir un écart de performance inférieur à 3 %. **Les tiges d'essai non standard répondent aux besoins personnalisés** grâce au moulage de précision (micro), à la CNC à cinq axes (formes complexes) et au HIP segmenté (grande taille), avec un écart de taille < 0,05 mm et un écart de performance < 3 %.

L'optimisation des procédés (dispersion ultrasonique, surveillance en ligne, etc.) et l'utilisation d'équipements de pointe (laser femtoseconde, tomographie à rayons X, etc.) améliorent considérablement la qualité des barres d'essai, et la constance des performances augmente de 20 %. À l'avenir, la fabrication additive (ébauches imprimées en 3D) et l'intelligence artificielle (optimisation des procédés) amélioreront encore l'efficacité de la préparation des barres d'essai nanométriques et non standard.

Standard :

GB/T 3851 : Résistance à la flexion.

ISO 3327 : Barres d'essai de flexion.

ISO 28079 : Ténacité à la rupture.

GB/T 3849 : Essai magnétique au cobalt.

ISO 4499 : Microstructure.

ISO 4505 : Porosité.

ASTM B406 : Résistance à la flexion.

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



Annexe :

Norme nationale pour les tiges d'essai en carbure

Les barres d'essai en métal dur ou en carbure cémenté sont utilisées pour tester des propriétés clés telles que la résistance transversale (TRS) et la ténacité à la rupture (KIC). Leur préparation, leurs spécifications et leurs essais doivent respecter des normes nationales strictes (GB/T) afin de garantir l'exactitude et la cohérence des résultats. Les normes nationales chinoises (GB/T) couvrent la préparation, les dimensions, les essais de performance, l'analyse de la microstructure et les essais de composition chimique des barres d'essai en carbure cémenté. Certaines normes sont alignées sur les normes internationales (telles que ISO 3327 et ISO 28079). Cet article détaille les normes nationales chinoises relatives aux barres d'essai en carbure cémenté, couvrant tous les aspects des spécifications, des essais de performance, de la préparation et de la vérification, ainsi que le contenu de la norme, son champ d'application et ses exigences spécifiques, le tout en chinois pour garantir un contenu précis, détaillé et captivant.

1. Aperçu

Les barreaux d'essai en carbure sont principalement utilisés pour les essais de résistance à la flexion (1,5 à 2,5 GPa) et de ténacité à la rupture (812 MPa·m^{1/2}). Les dimensions standard sont de 5 × 5 × 35 mm (flexion) et de 4 × 8 × 32 mm (ténacité, entaille 0,2 à 0,3 mm). La norme nationale chinoise (GB/T) fournit des spécifications pour la préparation et les essais des barreaux d'essai, couvrant les aspects suivants :

Spécifications des tiges d'essai : dimensions, tolérances, qualité de surface.

Essais de performance : dureté, résistance à la flexion, ténacité à la rupture, densité, etc.

Microstructure et composition chimique : granulométrie, porosité, teneur en carbone, etc.

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

Processus de préparation : dosage, mélange, frittage, traitement, etc.

relatif aux tiges d'essai en carbure cimenté dans l'ordre des numéros standard, expliquant leur contenu, leur champ d'application, leurs exigences spécifiques et leur relation avec les tiges d'essai une par une.

2. Normes nationales relatives aux tiges d'essai en carbure cimenté

Les normes nationales chinoises suivantes sont directement ou indirectement liées aux barres d'essai en carbure cimenté, couvrant tous les aspects de la préparation, des tests et de la vérification des barres d'essai.

2.1 GB/T 3851:2015 Méthode d'essai pour la résistance à la rupture transversale du carbure cimenté

Nom standard : Résistance à la rupture transversale du carbure cimenté.

Champ d'application : Il spécifie la méthode d'essai pour la résistance à la flexion (TRS) du carbure cimenté, qui est applicable aux barres d'essai et aux échantillons de produits finis et est largement utilisée dans les couteaux, les moules, les outils miniers, etc.

Exigences relatives aux tiges d'essai :

Dimensions : $5,0 \pm 0,1$ mm (largeur) \times $5,0 \pm 0,1$ mm (hauteur) \times $35,0 \pm 0,5$ mm (longueur).

Tolérances : largeur et hauteur $\pm 0,1$ mm, longueur $\pm 0,5$ mm, parallélisme $< 0,05$ mm, perpendicularité $< 0,05$ mm.

Rugosité de surface : $R_a < 0,4$ μ m, la surface portante est polie, sans fissures, pores ou effondrement des bords (défauts visibles à l'œil nu $< 0,1$ mm).

Chanfrein : $0,20,3$ mm, angle $45^\circ \pm 5^\circ$, pour éviter la concentration de contraintes.

Méthode d'essai :

Essai de flexion en trois points :

Équipement : Machine d'essai universelle, précision $\pm 0,1$ kN.

Espacement des pivots : $30 \pm 0,1$ mm, taux de chargement : $0,51$ mm/min.

Formule : $\sigma = 3FL / (2bh^2)$, F est la charge de rupture (N), L est la distance d'appui (mm), b et h sont la largeur et la hauteur de la barre d'essai (mm).

étape :

Les barres d'essai ont été polies ($R_a < 0,4$ μ m), nettoyées (éthanol) et séchées (80 °C, 30 min).

Placez la tige de test et ajustez le point d'appui pour assurer une force uniforme.

Appliquez la charge jusqu'à la rupture, enregistrez F et calculez σ (erreur $\leq \pm 5\%$).

Résultats : Résistance à la flexion $1,52,5$ GPa, comme YG6 $\sim 2,0$ GPa, YG15 $\sim 2,5$ GPa.

Relation avec la tige d'essai :

La spécification claire des dimensions, de la surface et des conditions d'essai des barres d'essai de résistance à la flexion constitue la norme de base pour la préparation des barres d'essai.

La géométrie de la barre d'essai doit être cohérente (tolérance $\pm 0,1$ mm) pour garantir une répartition uniforme des contraintes et un écart d'essai < 5 %.

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

Remarque : Équivalent à la norme ISO 3327:2009, applicable aux essais de barre d'essai standard.

2.2 GB/T 7997-2017 Méthode d'essai pour la dureté Vickers du carbure cémenté

Nom standard : Essai de dureté Vickers pour carbure cémenté.

Champ d'application : Spécifie la méthode d'essai de la dureté du carbure cémenté, applicable aux barres d'essai, aux produits finis ou à tout échantillon, utilisée pour vérifier la cohérence des performances des barres d'essai.

Exigences relatives aux tiges d'essai :

Échantillon : Surface polie, Ra < 0,2 µm, sans couche d'oxyde ni défaut.

Taille : > 5 × 5 mm, épaisseur > 1 mm, la tige d'essai est directement applicable.

Méthode d'essai :

Dureté Vickers (HV) :

Équipement : Duromètre Vickers, précision ±0,5%.

Pénétrateur : Pyramide quadrangulaire en diamant, angle au sommet 136°.

Charge : 1030 kgf (généralement HV30), maintenez pendant 1015 secondes.

Étape :

Polir la surface de la barre d'essai (Ra < 0,2 µm) et la nettoyer (éthanol).

Appliquer la charge et mesurer la diagonale d'indentation (µm, précision ±0,1 µm).

Calculez HV (erreur < ±50 HV) et prenez la moyenne de 35 points.

Résultat : Dureté 1400-2200 HV, comme YG6 ~1500 HV, grain ultrafin ~2000 HV.

Relation avec la tige d'essai :

Utilisé pour vérifier la dureté des barres d'essai (1400-2200 HV) afin de garantir la cohérence avec le produit fini.

Les barres d'essai ne nécessitent pas de préparation particulière et peuvent être testées après polissage pour vérifier la granulométrie et la teneur en cobalt.

Remarque : Équivalent à la norme ISO 65071:2005, applicable aux barreaux d'essai conventionnels et nano.

2.3 GB/T 3850-2015 Méthode de détermination de la masse volumique du carbure cémenté

Nom standard : Méthode de mesure de la densité du carbure cémenté.

Portée : Spécifie la méthode d'essai de la densité du carbure cémenté, applicable aux barres d'essai et autres échantillons, utilisée pour évaluer la porosité et l'uniformité de la composition.

Exigences relatives aux tiges d'essai :

Échantillon : bloc ou tige d'essai, masse > 1 g, surface propre, pas de couche d'oxyde.

Dimensions : Les tiges d'essai (5×5×35 mm ou 4×8×32 mm) sont directement applicables.

Méthode d'essai :

Méthode d'Archimède :

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

Matériel : balance de précision (précision $\pm 0,001$ g), eau déionisée.

Formule : $\rho = m1 / (m1 - m2) \times \rho_{eau}$, m1 est le poids sec (g), m2 est le poids dans l'eau (g).

Étape :

Les tiges d'essai ont été nettoyées (éthanol) et séchées (80°C, 30 min).

Le poids sec et le poids dans l'eau ont été mesurés 3 fois et la valeur moyenne a été prise.

Corrigé pour la température de l'eau ($\rho_{eau} \sim 1,0$ g/cm³, 20°C), erreur $< \pm 0,01$ g/cm³.

Résultat : Densité 14,0-15,0 g/cm³, comme YG6 $\sim 14,9$ g/cm³, YG15 $\sim 14,0$ g/cm³.

Relation avec la tige d'essai :

Utilisé pour vérifier la densité de la tige d'essai (14,015,0 g/cm³), reflétant la porosité ($< 0,01\%$) et la précision de la proportion.

La tige d'essai ne nécessite pas de préparation particulière et peut être directement testée pour vérifier la qualité du frittage.

Remarque : Équivalent à la norme ISO 3369:2006, applicable aux barres d'essai standard et non standard.

2.4 GB/T 3849-2015 Méthodes d'essai des propriétés magnétiques du carbure cémenté

Nom standard : Méthode de mesure des propriétés magnétiques du carbure cémenté.

Champ d'application : Spécifie la méthode d'essai indirecte pour l'intensité de magnétisation et la teneur en carbone de la phase cobalt du carbure cémenté, applicable aux barres d'essai et aux produits finis, utilisés pour détecter la phase η ou le carbone libre.

Exigences relatives aux tiges d'essai :

Échantillon : Tige d'essai ou petit échantillon ($> 5 \times 5$ mm), surface propre, pas d'oxydation.

Taille : Directement applicable aux barres d'essai de flexion ou de ténacité.

Méthode d'essai :

Test magnétique au cobalt :

Matériel : Magnétomètre (précision $\pm 0,1$ émeu/g).

L'intensité de magnétisation (emu/g) est mesurée et la teneur en carbone est indirectement déduite.

étape :

Nettoyez la tige de test (éthanol) et séchez-la.

Placez un magnétomètre et mesurez l'intensité de magnétisation, répétez 3 fois et prenez la valeur moyenne.

La teneur en carbone a été estimée en comparant avec la courbe standard (erreur $< \pm 0,05$ %).

Résultats : Intensité de magnétisation 120150 emu/g, comme YG6 ~ 150 emu/g, décarbonisation ~ 120 emu/g.

Relation avec la tige d'essai :

Utilisé pour vérifier la teneur en carbone de la barre d'essai ($6,13 \pm 0,1$ % en poids) et pour détecter la phase η (faible magnétisation) ou le carbone libre (forte magnétisation).

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

Les tiges d'essai ne nécessitent pas de préparation particulière et peuvent être directement testées pour vérifier les ingrédients et le processus de frittage.

Remarque : Applicable au carbure cimenté à base de cobalt, équivalent à la norme ISO 3326:2013.

2,5 GB/T 18376-2014 Méthode d'évaluation de la microstructure du carbure cimenté

Nom standard : Méthode d'évaluation de la microstructure du carbure cimenté.

Champ d'application : Spécifie la méthode d'observation et d'évaluation de la microstructure du carbure cimenté, applicable aux barres d'essai et aux produits finis, utilisée pour évaluer la granulométrie, la porosité et les défauts (tels que la phase η , le carbone libre).

Exigences relatives aux tiges d'essai :

Échantillons : polis ($R_a < 0,05 \mu\text{m}$), gravés (réactif de Murakami, 510 sec).

Taille : Tranches de tige d'essai ($> 5 \times 5 \text{ mm}$) ou tige entière polie.

Méthode d'essai :

Microscope optique/MEB :

La taille des grains ($0,52 \mu\text{m}$), la porosité ($< 0,01\%$) et la distribution des phases ont été observées.
Norme d'évaluation : A02B00C00 (porosité $< 0,01 \%$, ISO 4505).

DRX :

Détectez la composition de phase (telle que WC, Co, $\text{Co}_3\text{W}_3\text{C}$) avec une sensibilité de $0,1 \%$.

étape :

Polir la barre de test, graver et nettoyer (éthanol).

L'observation au microscope ($50 \times 1000 \times$) a été utilisée pour mesurer la taille des grains (erreur $< \pm 0,1 \mu\text{m}$).

Analyse XRD phase η /carbone libre (ratio $< 1\%$).

Résultats : Granulométrie $0,52 \mu\text{m}$ (conventionnel) ou $< 0,5 \mu\text{m}$ (grain ultrafin), phase $\eta < 1\%$.

Relation avec la tige d'essai :

Utilisé pour vérifier la microstructure (grains, pores, défauts) de la barre d'essai afin de garantir la cohérence avec le produit fini.

Les barres d'essai sont polies et gravées pour évaluer la qualité du frittage et le contrôle des grains.

Remarque : Équivalent à la norme ISO 44991:2008, applicable aux barreaux d'essai nano et conventionnels.

2.6 GB/T 5314-2011 Méthodes d'analyse chimique du carbure cimenté

Nom standard : Méthodes d'analyse chimique du carbure cimenté.

Champ d'application : Il spécifie les méthodes d'analyse d'éléments tels que le tungstène, le cobalt et le carbone dans le carbure cimenté. Il est applicable aux tiges d'essai et aux matières premières pour vérifier la composition chimique.

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

Exigences relatives aux tiges d'essai :

Échantillon : poudre ou petits morceaux ($>0,1$ g), la tige de test doit être écrasée (<100 μm).

Taille : Échantillonnage direct ou découpage de tiges d'essai.

Méthode d'essai :

Analyse du carbone et du soufre : méthode de combustion, mesure du CO_2 , détection du carbone total (précision $\pm 0,01\%$).

ICPMS : Dissolution acide, détection de W, Co, Cr, etc. (précision $\pm 0,001\%$).

étape :

Écraser la tige d'essai (<100 μm) et laver (eau déionisée).

Combustion ou dissolution, analyse de la teneur en éléments, répétée 3 fois.

La teneur en carbone a été vérifiée ($6,13 \pm 0,1$ % en poids) avec une erreur de $< \pm 0,05$ %.

Résultats : Carbone $\sim 6,13$ % en poids, Cobalt 615 % en poids, Impuretés $< 0,05$ %.

Relation avec la tige d'essai :

Pour vérifier la composition chimique de la barre d'essai (carbone, cobalt) et s'assurer qu'il n'y a pas de décarburation (phase η) ou de carburation (carbone libre).

La tige d'essai doit être écrasée pour vérifier l'exactitude des ingrédients et du frittage.

Remarque : Applicable aux carbures cimentés à base de cobalt et de nickel. Certaines méthodes se réfèrent à la norme ISO 11876.

2.7 GB/T 1482-2010 Détermination de la fluidité de la poudre de carbure cimenté

Nom standard : Méthode de détermination de la fluidité des poudres de carbure cimenté.

Champ d'application : Spécifie la méthode d'essai pour la fluidité de la poudre de carbure cimenté, applicable au processus de mélange et de séchage par atomisation avant la préparation des barres d'essai.

Exigences relatives aux tiges d'essai :

Échantillon : Poudre après mélange (D50 50200 μm), qui affecte indirectement la qualité de la barre d'essai vierge.

Taille : Pas directement liée à la tige d'essai, mais affecte l'uniformité du pressage.

Méthode d'essai :

Débitmètre à effet Hall :

Équipement : Entonnoir standard (ouverture 2,5 mm), précision $\pm 0,1$ s.

Mesurer le temps nécessaire à l'écoulement de 50 g de poudre (s/50 g).

étape :

La poudre séchée par atomisation (D50 50200 μm) a été prélevée et séchée (80°C , 1 h).

Verser dans un entonnoir, enregistrer le temps d'écoulement, répéter 3 fois et prendre la valeur moyenne.

Fluidité : < 25 s/50 g (conventionnel), < 20 s/50 g (poudre nano).

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

Résultats : YG6 ~25 s/50 g, YG8N ~18 s/50 g.

Relation avec la tige d'essai :

Assurer la fluidité de la poudre mélangée (<25 s/50 g), améliorer l'uniformité du blank (>95%), et réduire la porosité de la tige d'essai (<0,01%).

Affecte indirectement la qualité du pressage et du frittage des barres d'essai.

Remarque : Applicable aux poudres nano et conventionnelles, se référer à la norme ASTM B213.

2.8 GB/T 5169-2013 Méthode d'essai de la porosité du carbure cimenté

Nom standard : Méthode de détermination de la porosité du carbure cimenté.

Champ d'application : Spécifie la méthode d'essai de la porosité du carbure cimenté, applicable aux barres d'essai et aux produits finis, utilisée pour évaluer la qualité du frittage.

Exigences relatives aux tiges d'essai :

Échantillons : polis ($R_a < 0,05 \mu\text{m}$), tranches de barre d'essai ou barres entières.

Taille : $> 5 \times 5 \text{ mm}$, la tige d'essai est directement applicable.

Méthode d'essai :

Observation au microscope :

Matériel : Microscope optique ou MEB (précision $\pm 0,1 \mu\text{m}$).

Classification : Type A ($< 25 \mu\text{m}$), Type B ($2550 \mu\text{m}$), Type C (carbone libre).

Norme : A02B00C00 (porosité $< 0,01 \%$).

étape :

Polissez la tige de test et nettoyez-la (éthanol).

L'observation au microscope ($100 \times 500 \times$) a été utilisée pour compter le nombre et la taille des pores.

Évaluer la porosité (erreur $\leq \pm 0,005\%$).

Résultat : Porosité $< 0,01 \%$, comme la barre de test HIP $< 0,005 \%$.

Relation avec la tige d'essai :

Vérifier la porosité de la barre d'essai ($< 0,01\%$) pour garantir la qualité des processus de frittage et de HIP.

Les barres d'essai sont polies pour évaluer l'effet des défauts internes sur la résistance et la ténacité.

Remarque : Équivalent à la norme ISO 4505:1978, applicable aux barres d'essai standard et non standard.

2.9 GB/T 4334-2020 Méthode d'essai de résistance à la corrosion du carbure cimenté

Nom de la norme : Méthodes d'essai pour la résistance à la corrosion du carbure cimenté.

Champ d'application : Spécifie la méthode d'essai pour la résistance à la corrosion du carbure cimenté, applicable aux barres d'essai et aux produits finis, utilisée pour évaluer la stabilité chimique.

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

Exigences relatives aux tiges d'essai :

Échantillon : Poli ($R_a < 0,2 \mu\text{m}$), $> 10 \times 10 \text{ mm}$, adapté aux sections de barres d'essai.

Taille : La barre d'essai doit être coupée ou polie.

Méthode d'essai :

Test d'immersion :

Milieu : HCl 5% (pH 47), température 60°C, durée 168 heures.

La perte de masse (mg) a été mesurée et le taux de corrosion (mm/an, erreur $< \pm 10\%$) a été calculé.

Essais électrochimiques :

Équipement : Poste de travail électrochimique, mesure du potentiel de corrosion (V) et de la densité de courant ($\mu\text{A}/\text{cm}^2$).

étape :

Polir la tige de test et la nettoyer (eau déionisée).

Test d'immersion ou électrochimique, enregistrer les données, répéter 3 fois.

Calculer le taux de corrosion ($< 0,01 \text{ mm/an}$).

Résultats : YG6 $\sim 0,01 \text{ mm/an}$, YN10 $< 0,005 \text{ mm/an}$.

Relation avec la tige d'essai :

Vérifier la résistance à la corrosion des barres d'essai ($< 0,01 \text{ mm/an}$) et évaluer l'impact de η sur les performances.

La tige d'essai doit être polie pour vérifier indirectement la composition chimique et la microstructure.

Remarque : Reportez-vous à la norme ASTM G31, applicable aux alliages à base de cobalt et de nickel.

2.10 GB/T 12444-2006 Méthode d'essai de résistance à l'usure du carbure cémenté

Nom standard : Méthode d'essai de résistance à l'usure du carbure cémenté.

Champ d'application : Spécifie la méthode d'essai de résistance à l'usure du carbure cémenté, applicable aux barres d'essai et aux produits finis, utilisée pour évaluer la durée de vie.

Exigences relatives aux tiges d'essai :

Échantillon : Poli ($R_a < 0,2 \mu\text{m}$), $> 10 \times 10 \text{ mm}$, adapté aux sections de barres d'essai.

Taille : La barre d'essai doit être coupée ou polie.

Méthode d'essai :

Essai d'abrasion :

Équipement : Meule (Al_2O_3 , granulométrie 60100 μm), charge 1020 N.

Conditions : vitesse de rotation 200300 tr/min, temps 3060 minutes.

La perte de masse a été mesurée (mg, erreur $< \pm 5\%$).

Usure du disque à broches :

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

Equipement : Testeur d'usure à goupille sur disque, disque de friction (acier ou céramique).
Mesurer le volume d'usure (mm^3).

étape :

Polissez la tige de test et nettoyez-la (éthanol).

Définissez les conditions, testez l'usure et répétez 3 fois.

Calculer le taux d'usure (par exemple $0,01 \text{ mm}^3 / \text{N} \cdot \text{m}$).

Résultats : YG6 $\sim 0,01 \text{ mm}^3 / \text{N} \cdot \text{m}$, YN10 $\sim 0,008 \text{ mm}^3 / \text{N} \cdot \text{m}$.

Relation avec la tige d'essai :

Vérifier la résistance à l'usure des barres d'essai et évaluer l'effet de la taille des grains et de la dureté sur la durée de vie.

La barre d'essai doit être polie pour vérifier indirectement la qualité de la microstructure.

Remarque : Reportez-vous aux normes ASTM B611 et G99 pour les barres d'essai standard et non standard.

3. Normes nationales indirectement liées

Bien que les normes nationales suivantes ne soient pas directement applicables aux barres d'essai, elles ont un impact important sur le processus de préparation et le contrôle qualité, et garantissent indirectement les performances des barres d'essai.

3.1 GB/T 52432008 Nuances de carbure cémenté

Nom standard : Nuances de carbure cémenté.

Champ d'application : Spécifie les performances, la composition et l'application des nuances de carbure cémenté (telles que YG6, YG15, YN10).

Relation avec la tige d'essai :

Définir les recettes de barres d'essai et les objectifs de performance, tels que YG6 (6 % Co, dureté 1500 HV), YG15 (15 % Co, KIC $12 \text{ MPa} \cdot \text{m}^{1/2}$).

Assurez-vous que la tige de test est conforme au nom de la marque et que l'erreur d'ingrédient est $< 0,1 \%$.

contenu :

Composition : WC, teneur en Co, Ni, carbone $6,13 \pm 0,1 \%$ en poids.

Propriétés : dureté 1400-2200 HV, résistance à la flexion 1,5-2,5 GPa.

Remarque : Il est fait référence à la norme ISO 513, qui fournit des critères de performance pour la préparation des barres d'essai.

3.2 GB/T 34505-2017 Exigences techniques pour la préparation de poudres de carbure cémenté

Nom de la norme : Spécification technique pour la préparation de poudres de carbure cémenté.

Champ d'application : Il spécifie la taille des particules, la pureté et les exigences de préparation de la poudre de carbure cémenté et convient au dosage et au mélange des tiges d'essai.

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

Relation avec la tige d'essai :

Assurer la qualité de la poudre (granulométrie WC 0,12 μm , pureté > 99,9 %) et améliorer l'uniformité de la tige d'essai (> 95 %).

Contrôler la teneur en oxygène (<0,05%) et éviter la décarburation (phase η).

contenu :

Taille des particules : D50 0,12 μm (conventionnel), 0,10,4 μm (nanomètre).

Pureté : WC > 99,9 %, Co > 99,9 %, impuretés < 0,01 %.

Fluidité : <25 s/50 g (GB/T 1482).

Remarque : Applicable aux lots de barres d'essai nano et conventionnelles.

3.3 GB/T 26048-2010 Conditions techniques pour le frittage du carbure cémenté

Nom de la norme : Spécification technique pour le frittage du carbure cémenté.

Champ d'application : Spécifie les paramètres du processus de frittage du carbure cémenté et s'applique au frittage des tiges d'essai.

Relation avec la tige d'essai :

Assurer la qualité de frittage de la tige d'essai (porosité < 0,01 %, phase η < 1 %).

Contrôler la température de frittage (1350/1450°C, $\pm 5^\circ\text{C}$) et l'atmosphère (<10⁻³ Pa).

contenu :

Température : 1350-1450 °C (conventionnel), 1320-1380 °C (nano).

Degré de vide : < 10⁻³ Pa, oxygène < 0,01 %.

HIP : 1350/1450°C, 100/150 MPa, porosité <0,01%.

Remarques : Applicable au frittage sous vide et au procédé HIP.

4. Correspondance entre les normes nationales et les normes internationales

Certaines normes nationales sont équivalentes ou font référence à des normes internationales (ISO, ASTM), améliorant ainsi l'applicabilité mondiale des essais sur tiges d'essai :

GB/T 38512015 \approx ISO 3327:2009 (résistance à la flexion).

GB/T 79972017 \approx ISO 65071:2005 (dureté Vickers).

GB/T 38502015 \approx ISO 3369:2006 (densité).

GB/T 38492015 \approx ISO 3326:2013 (propriétés magnétiques).

GB/T 183762014 \approx ISO 44991:2008 (microstructure).

GB/T 51692013 \approx ISO 4505:1978 (porosité).

GB/T 43342020 fait référence à la norme ASTM G31 (résistance à la corrosion).

GB/T 124442006 fait référence à la norme ASTM B611/G99 (résistance à l'abrasion).

5. Combinaison de la préparation des tiges d'essai et des normes nationales

La préparation des tiges d'essai doit être entièrement conforme aux normes nationales ci-dessus, et les applications spécifiques sont les suivantes :

Ingrédients :

Conforme aux normes **GB/T 52432008** (composition de qualité, telle que YG6 : 6 % Co), **GB/T**

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

53142011 (carbone $6,13 \pm 0,1$ %).

Contrôle de la qualité de la poudre (**GB/T 345052017** , pureté WC > 99,9%).

Mixage :

Assure la fluidité (**GB/T 14822010** , <25 s/50 g) et l'uniformité des particules >95%.

supprimer :

Pressage isostatique à froid (200350 MPa), la taille de la billette prend en compte le retrait (**GB/T 38512015** , par exemple $6,2 \times 6,2 \times 43$ mm).

frittage :

Frittage sous vide + HIP (**GB/T 260482010** , 1350/1450°C, porosité <0,01%).

Traitement :

Meulage et polissage (**GB/T 38512015** , Ra <0,4 μm ; **ISO 28079** , entaille 0,20,3 mm).

vérifier :

Taille : $\pm 0,1$ mm (**GB/T 38512015**).

Propriétés : dureté (**GB/T 79972017** , 1400/2200 HV), densité (**GB/T 38502015** , 14,015,0 g/cm³).

Microstructure : granulométrie 0,52 μm , phase η <1% (**GB/T 183762014**).

Composition chimique : Carbone $\pm 0,05\%$ (**GB/T 53142011** , **GB/T 38492015**).

6. Cas d'application pratique

Barre d'essai de flexion YG6 :

Norme : GB/T 38512015 (taille $5 \times 5 \times 35$ mm, Ra <0,4 μm), GB/T 79972017 (dureté 1500 HV), GB/T 38492015 (carbone 6,13%).

Préparation : WC 94 % en poids, Co 6 % en poids, fritté à 1400°C, broyé Ra <0,4 μm .

Résultats : résistance à la flexion 2,0 GPa, dureté 1500 HV, durée de vie à la coupe 2 heures.

Barre d'essai de ténacité YG15 :

Normes : ISO 28079 (dimensions $4 \times 8 \times 32$ mm, entaille 0,25 mm), GB/T 38502015 (densité 14,0 g/cm³), GB/T 183762014 (granulométrie $\sim 1,8$ μm).

Préparation : WC 85 % pds %, Co 15 % pds %, 1450°C HIP, entaille d'étincelle.

Résultats : KIC 12 MPa·m^{1/2}, densité 14,0 g/cm³, durée de vie au poinçonnage 120 000 fois.

Tige de test nano YG8N :

Normes : GB/T 38512015 (résistance à la flexion), GB/T 183762014 (grain <0,5 μm), GB/T 53142011 (carbone $\pm 0,03\%$).

Préparation : WC 0,20,4 μm , fritté à 1350°C, entaillé au laser femtoseconde.

Résultats : dureté 2000 HV, résistance à la flexion 2,2 GPa, durée de vie de l'outil aviation 4 heures.

7. Conclusion

La préparation et les essais des tiges d'essai en carbure cémenté doivent être conformes aux normes nationales fondamentales suivantes :

GB/T 38512015 : Barre d'essai de résistance à la flexion ($5 \times 5 \times 35$ mm, Ra <0,4 μm).

GB/T 79972017 : Dureté (1400 - 2200 HV).

GB/T 38502015 : Densité (14,015,0 g/cm³).

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

- GB/T 38492015** : Propriétés magnétiques (carbone $\pm 0,05\%$).
- GB/T 183762014** : Microstructure (granulométrie $0,52 \mu\text{m}$, phase $\eta < 1\%$).
- GB/T 53142011** : Composition chimique (carbone $6,13 \pm 0,1\%$).
- GB/T 51692013** : Porosité ($< 0,01\%$).
- GB/T 43342020** : Résistance à la corrosion ($< 0,01 \text{ mm/an}$).
- GB/T 124442006** : Résistance à l'abrasion ($\sim 0,01 \text{ mm}^3 / \text{N} \cdot \text{m}$).
- GB/T 1482-2010** : Fluidité des poudres ($< 25 \text{ s/50 g}$).
- GB/T 52432008** : Performance de la marque.
- GB/T 34505-2017** : Préparation en poudre.
- GB/T 260482010** : Procédé de frittage.

Ces normes couvrent les spécifications (tolérance $\pm 0,1 \text{ mm}$), les performances (dureté, résistance, ténacité), la préparation (ingrédients, frittage, transformation) et la vérification (microstructure, composition chimique) des barres d'essai, garantissant la constance de leurs performances (écart $< 5 \%$). Certaines normes nationales équivalentes à l'ISO (telles que GB/T 3851 \approx ISO 3327), applicables aux barres d'essai standard, nano et non standard. À l'avenir, une surveillance intelligente et un traitement automatisé amélioreront encore l'efficacité de la mise en œuvre des normes nationales.

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



GB/T 3851-2015 Barre d'essai de résistance à la flexion en carbure cémenté

1 Portée

Cette norme spécifie la préparation, les exigences dimensionnelles, les méthodes d'essai et les exigences techniques associées des barres d'essai de résistance à la flexion en carbure cémenté. Elle s'applique aux matériaux et produits en carbure cémenté dont la phase dure est le carbure de tungstène (WC) et la phase de liaison le cobalt (Co). Elle permet de déterminer la résistance à la flexion, indicateur important pour l'évaluation des propriétés mécaniques des matériaux. Cette méthode est adaptée aux essais de performance dans le cadre du contrôle qualité, de l'acceptation des produits et de la recherche et développement.

Cette norme ne s'applique pas aux carbures cémentés sans cobalt ni aux matériaux contenant des inclusions non métalliques significatives.

2 Références normatives

Les documents suivants sont essentiels à l'application de la présente norme. Pour tout document référencé daté, seule la version datée s'applique. Pour tout document référencé non daté, la dernière version (y compris tous les amendements) s'applique.

GB/T 3848 Détermination de la teneur en cobalt dans le carbure cémenté

GB/T 3850 Méthode de détermination de la coercivité du carbure cémenté

GB/T 5313 Méthodes d'essai de flexion en trois et quatre points pour matériaux métalliques à température ambiante

ISO 3327:2009 Carbure cémenté - Détermination de la résistance à la flexion

ISO 4505:1978 Carbure cémenté - Préparation de barres d'essai de résistance à la flexion

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

3 Termes et définitions

Les termes et définitions suivants s'appliquent à cette norme.

3.1 Résistance à la flexion :

Contrainte maximale supportée par une barre d'essai en carbure lors d'un essai de flexion en trois ou quatre points. L'unité est le MPa (mégapascals), qui reflète la capacité du matériau à résister à la rupture.

3.2 Le métal dur est un matériau composite composé de carbure de tungstène (WC)

comme phase dure et de cobalt (Co) comme phase de liaison grâce au procédé de métallurgie des poudres.

3.3 Barre d'essai

Un échantillon normalisé utilisé pour les essais de résistance à la flexion, avec des dimensions et une qualité de surface spécifiques.

3.4 Portée :

Distance entre les points d'appui lors de l'essai de flexion, en mm.

4 Principe

La résistance à la flexion est la capacité du carbure cémenté à résister à la rupture sous une charge de flexion. Elle est déterminée par un essai de flexion en trois ou quatre points. La tige d'essai est placée sur le point d'appui et une charge concentrée ou uniformément répartie est appliquée. La force maximale à la rupture est enregistrée et la résistance à la flexion est calculée en fonction des dimensions géométriques de la tige d'essai et des propriétés du matériau. La formule est la suivante :

$$\sigma_f = \frac{3FL}{2bh^2} \quad (\text{二点弯曲})$$

$$\sigma_f = \frac{FL}{bh^2} \quad (\text{四点弯曲})$$

其中:

- σ_f : 抗弯强度 (MPa);
- F : 断裂载荷 (N);
- L : 跨距 (mm);
- b : 试棒宽度 (mm);
- h : 试棒高度 (mm).

Les défauts de surface, la granulométrie et la porosité ont un impact significatif sur les résultats, et la qualité de la préparation des tiges d'essai doit être strictement contrôlée.

5. Préparation de la tige d'essai

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

5.1 Exigences matérielles

Les barres d'essai doivent être préparées à partir du même lot de matières premières que le carbure cémenté à tester.

L'écart de teneur en cobalt est $< 0,1\%$ en poids et la fluctuation de la taille des grains est $< 5\%$.

5.2 Dimensions et tolérances

- 形状：矩形截面试样。
- 标准尺寸：
 - 长度：大于跨距 + 2 * 支承点直径 (通常 20-50 mm 余量)。
 - 宽度 (b)：(6.0 ± 0.1) mm 或 (10.0 ± 0.1) mm。
 - 高度 (h)：(2.0 ± 0.05) mm, (3.0 ± 0.05) mm 或 (5.0 ± 0.1) mm。
- 跨距 (L)：20 mm, 30 mm 或 40 mm, 视试样高度选择 (通常 $L/h = 10 \sim 10$)。
- 表面质量：表面光滑, 无裂纹 ($< 5 \mu\text{m}$)。划痕或孔隙 (孔隙率 $< 0.05\%$)，边缘倒角 0.1-0.2 mm。

5.3 Processus de préparation

Pressage : Le pressage isostatique ou le pressage uniaxial avec une pression de 150-200 MPa est utilisé pour assurer l'uniformité de la densité ($> 99\%$).

Frittage : température 1350-1500°C, temps 1-2 heures, sous vide ou atmosphère protectrice d'hydrogène.

Traitement : Utiliser une meule diamantée ou un usinage par étincelle électrique à la taille spécifiée, rugosité de surface $Ra \leq 0,4 \mu\text{m}$.

Inspection : Chaque lot de barres d'essai est soumis à une inspection visuelle et à une mesure dimensionnelle, et 5 % des barres d'essai sont échantillonnées au hasard pour une analyse de densité et de microstructure.

5.4 Nombre de barres d'essai

barres de test pour chaque lot, dont au moins 5 sont utilisées pour les tests et le reste pour la sauvegarde.

6 Instruments et équipements

6.1 Machine d'essai de matériaux universelle

avec plage de charge de 0 à 50 kN, précision de $\pm 0,5\%$, équipée d'un dispositif de flexion à trois ou quatre points.

6.2 Un micromètre

d'une précision de $\pm 0,01$ mm est utilisé pour mesurer les dimensions de la tige d'essai.

6.3 Un microscope métallographique

avec un grossissement de 200x à 500x est utilisé pour vérifier les défauts de surface.

6.4

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

La température de l'environnement de test est contrôlée dans une boîte à température constante à 20-25°C et l'humidité est <60%.

7 Méthodes d'essai

7.1 Conditions d'essai

Température ambiante : 20-25°C, fluctuation de température <±2°C.

Humidité relative : < 60 %, pour éviter que la tige d'essai n'absorbe l'humidité.

Vitesse de chargement : 0,5-1,0 mm/min (ajustée en fonction de la taille de la tige d'essai).

7.2 Installation de la tige d'essai

Placez la barre d'essai sur le dispositif de pliage, alignez le point de support avec la longueur de la barre d'essai et réglez la portée conformément à la norme.

Assurez-vous que la tige de test n'est pas inclinée et que les points d'appui sont en contact uniforme.

7.3 Étapes de test

1. 測量試樣寬度 (b) 和高度 (H), 取3點平均值。
2. 安裝試棒, 調整跨距 (L), 記錄初始狀態。
3. 以指定速度加載, 直至試棒斷裂, 記錄最大載荷 (F)。
4. 重復測試 5-10 根試棒, 取平均值作為抗彎強度。
5. 檢查斷裂面, 記錄斷裂模式 (脆性或韌性)。

7.4 Traitement des données

Calcul de la résistance à la flexion 計算抗彎強度 (σ_f), 保留1位小數。

Si le résultat d'une seule tige d'essai s'écarte de la valeur moyenne de > 10 %, elle doit être rejetée et recalculée.

Les écarts types sont indiqués à ± 5 %.

8 Expression des résultats

La résistance à la flexion est mesurée en MPa avec une décimale (par exemple 2200,5 MPa).

Le rapport d'essai doit inclure :

- a) Numéro de norme : GB/T 3851-2015 ; b) Description de la barre d'essai : marque, lot, taille ; c) Conditions d'essai : température, humidité, portée ; d) Modèle d'instrument et état d'étalonnage ; e) Résultats : valeur moyenne et écart type de la résistance à la flexion ; f) Description anormale : si le résultat s'écarte de > 10 %, expliquez la raison ; g) Date d'essai : par exemple le 21 mai 2025 ; h) Testeur : signature.

9 Précision et biais

9.1 Précision

Répétabilité : L'écart de résistance à la flexion mesuré par le même opérateur et le même équipement est < 5 %.

Reproductibilité : L'écart de résistance à la flexion mesuré par différents laboratoires est <10%.

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

9.2 Biais

Erreur de l'instrument : $\pm 0,5 \%$ Influence de l'erreur de charge $< 1 \%$.

Défauts de la barre d'essai : les fissures ou les pores de surface entraînent une sous-estimation de la résistance de 5 à 15 %.

Chargement inégal : un chargement excentrique peut faire dévier les résultats de 2 à 5 %.

10 facteurs d'influence

10.1 Taille des grains :

Les grains fins (0,2-0,5 μm) ont une résistance à la flexion de 2200-2500 MPa, les grains grossiers ($>5 \mu\text{m}$) ont une résistance à la flexion de 1800-2000 MPa.

10.2 Teneur en cobalt :

La teneur en cobalt est de 6 à 15 %. À mesure que la teneur augmente, la résistance à la flexion diminue légèrement (5 à 10 %), mais la ténacité augmente.

10.3

Porosité Une porosité $> 0,1 \%$ réduira la résistance de 10 à 20 %, et la densité doit être contrôlée à $> 99,5 \%$.

10.4 Qualité de surface

Les rayures ou microfissures entraînent une concentration locale des contraintes et une réduction de la résistance de 5 à 10 %.

10.5 Conditions d'essai

Une température élevée ($> 200 \text{ }^\circ\text{C}$) réduit la résistance de 5 à 15 %. L'humidité affecte de $< 2 \%$.

11 Application des résultats des tests

11.1 Classification des performances

Résistance à la flexion $> 2200 \text{ MPa}$: convient aux outils de haute dureté.

Résistance à la flexion 1800-2200 MPa : convient aux moules de ténacité moyenne et élevée.

11.2 Optimisation du procédé

Une faible résistance indique des grains grossiers ou une porosité élevée. Ajuster les paramètres de frittage (1350-1450 $^\circ\text{C}$).

11.3 Contrôle de qualité

Vérifiez si la résistance à la flexion répond aux exigences de conception, telles que l'objectif YG6 de $2300 \pm 100 \text{ MPa}$.

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

11.4 Exemple

En découpe, la résistance à la flexion du YG8 2100 MPa assure une durée de vie de l'outil > 3 heures.

12 notes

12.1 Étalonnage de l'instrument

Avant le test, étalonnez la machine d'essai à une erreur de $\leq \pm 0,5\%$.

12.2 Qualité de la barre d'essai

Assurez-vous que la barre d'essai est exempte de défauts et que l'écart dimensionnel est $\leq \pm 0,1$ mm.

12.3

La température de la salle d'essai est contrôlée à 20-25°C et l'humidité est <60%.

12.4 Protection de sécurité

Portez des lunettes de protection pendant le fonctionnement pour éviter les éclaboussures dues à la rupture de la tige d'essai.

13 Annexe (Annexe informative)

Annexe A Valeurs typiques de résistance à la flexion

Tableau A.1 Résistance à la flexion des nuances courantes de carbure cémenté

Marque	Teneur en cobalt (% en poids)	Taille des grains (μm)	Résistance à la flexion (MPa)
YG6	6	1-2	2200-2400
YG8	8	2-3	2000-2200
YG10	10	2-4	1800-2000

Annexe B Analyse des erreurs

B.1 Erreur de l'instrument

$\pm 0,5\%$ L'erreur de charge affecte la résistance < 1 %.

B.2 Un défaut

de porosité de la barre d'essai de 0,1 % entraîne une diminution de 10 % de la résistance.

B.3 Influences environnementales Une température élevée

de 200°C entraîne une diminution de la résistance de 5 à 15 %.

Annexe C Suggestions d'amélioration

C.1 Utiliser la flexion à quatre points pour améliorer l'uniformité des contraintes et réduire l'impact des défauts de surface.

C.2 Utiliser un usinage CNC de haute précision pour garantir que l'écart de taille de la tige d'essai est $\leq \pm 0,05$ mm. C.3 Introduire des tests par ultrasons pour détecter les microfissures internes.

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

Annexe D Exemples de données de test

Tableau D.1 Données d'essai de résistance à la flexion du carbure cimenté YG8

Numéro d'échantillon	Largeur (mm)	Hauteur (mm)	Portée (mm)	Charge de rupture (N)	de Résistance à la flexion (MPa)	Valeur moyenne (MPa)
YG8-001	6.02	2.01	20	4500	2110	2090
YG8-002	6.01	2,00	20	4400	2070	2090
YG8-003	6,00	2.02	20	4600	2140	2090



COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

GB/T 7997-2017 Méthode d'essai de dureté pour le carbure cimenté

1 Portée

Cette norme spécifie la méthode d'essai de dureté des matériaux et produits en carbure cimenté. Cette méthode s'applique aux carbures cimentés (tels que YG6, YG8, etc.) dont la phase dure est le carbure de tungstène (WC) et la phase liante le cobalt (Co). Elle permet de mesurer la dureté selon la méthode Vickers (HV) ou Rockwell (HRA). Elle peut être utilisée pour le contrôle qualité en production, l'acceptation des produits et les essais de performance en recherche et développement.

Cette norme ne s'applique pas aux carbures cimentés sans cobalt ni aux matériaux non métalliques.

2 Références normatives

Les documents suivants sont essentiels à l'application de la présente norme. Pour tout document référencé daté, seule la version datée s'applique. Pour tout document référencé non daté, la dernière version (y compris tous les amendements) s'applique.

GB/T 230.1 Essai de dureté Rockwell pour matériaux métalliques Partie 1 : Méthode d'essai

GB/T 231.1 Essai de dureté Brinell pour matériaux métalliques Partie 1 : Méthode d'essai

GB/T 3848 Détermination de la teneur en cobalt dans le carbure cimenté

GB/T 3850 Méthode de détermination de la coercivité du carbure cimenté

ISO 3738-1:1982 Méthode d'essai pour la dureté Vickers du carbure cimenté

ISO 6507-1:2005 Essai de dureté Vickers pour matériaux métalliques Partie 1 : Méthode d'essai

3 Termes et définitions

Les termes et définitions suivants s'appliquent à cette norme.

3.1 Dureté

La capacité du carbure cimenté à résister à l'indentation ou aux rayures, généralement exprimée en dureté Vickers (HV) ou en dureté Rockwell (HRA).

3.2 Le métal dur est un matériau composite composé de carbure de tungstène (WC)

comme phase dure et de cobalt (Co) comme phase de liaison grâce au procédé de métallurgie des poudres.

3.3 La dureté Vickers (HV)

est la valeur de dureté calculée en pressant un pénétrateur en diamant tétraédrique régulier dans la surface de l'échantillon sous une charge spécifiée et en mesurant la longueur diagonale de l'empreinte.

3.4 La dureté Rockwell (HRA)

est la valeur de dureté calculée en pressant un pénétrateur à cône diamanté dans la surface d'un

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

échantillon sous une charge spécifiée et en mesurant la profondeur de pénétration.

4 Principe

Le test de dureté au carbure cémenté applique une charge spécifique, mesure la taille ou la profondeur de l'empreinte sur la surface du matériau sous l'action du pénétrateur et calcule la valeur de dureté.

Dureté Vickers (HV)

À l'aide d'un pénétrateur diamant tétraédrique standard (angle au sommet : 136°), former une empreinte carrée sous charge et mesurer la longueur diagonale. La formule de calcul est :

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

F : charge d'essai (N) ;

d : Longueur diagonale moyenne de l'indentation (mm).

Dureté Rockwell (HRA)

Un pénétrateur conique diamant (angle au sommet 120°, rayon supérieur 0,2 mm) a été utilisé pour appliquer la charge initiale (98,07 N) et la charge totale (588,4 N), et la différence de profondeur d'indentation a été mesurée. La formule de calcul est la suivante :

$$HRA = 100 - \frac{h}{0.002}$$

Où : h : Différence de profondeur de pénétration entre la charge initiale et la charge totale (mm).

5. Instruments et équipements

5.1 Testeur de dureté Vickers

Plage de charge : 49,03 N (5 kgf), 98,07 N (10 kgf), 294,2 N (30 kgf).

Précision : erreur de charge $\pm 0,5$ %, erreur de mesure au microscope $\pm 0,001$ mm.

5.2 Testeur de dureté Rockwell

Conforme à la norme GB/T 230.1, échelle A, charge 588,4 N (60 kgf).

Précision : $\pm 0,5$ HRA.

5.3 Bloc de test

Blocs d'essai de dureté standard pour l'étalonnage des instruments, écart $< \pm 1$ HRA ou ± 10 HV.

5.4 Meule diamantée

Utilisé pour le polissage de la surface de l'échantillon, rugosité de surface $Ra \leq 0,2$ μm .

5.5 Microscope

Grossissement 100x-500x, utilisé pour mesurer la taille de l'indentation.

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

5.6 Boîte à température constante

La température de l'environnement de test a été contrôlée à 20-25°C et l'humidité était <60%.

6. Échantillons

6.1 Exigences relatives à l'échantillon

Forme : Échantillon plat, épaisseur ≥ 2 mm, surface ≥ 10 mm \times 10 mm.

Etat de surface : Poli à $Ra \leq 0,2$ μ m, exempt de fissures (<5 μ m), de pores (porosité <0,05%) ou de couche d'oxyde.

Homogénéité : écart de composition < 0,1 % en poids, fluctuation de la granulométrie < 5 %.

Quantité : Pas moins de 3 spécimens par lot.

6.2 Préparation des échantillons

Découper les échantillons à partir d'ébauches en carbure ou de produits finis pour éviter d'introduire des contraintes (<100 MPa).

Polir la surface avec une meule diamantée pour assurer une planéité de < 0,01 mm.

Les échantillons ont été lavés à l'éthanol, séchés et placés dans un dessiccateur.

7 Méthodes d'essai

7.1 Conditions d'essai

Température ambiante : 20-25°C, fluctuation de température $< \pm 2^\circ$ C.

Humidité relative : < 60 %, éviter l'absorption d'humidité par l'échantillon.

Étalonnage de l'instrument : Étalonné à l'aide de blocs de test standard, écart $< \pm 1$ HRA ou ± 10 HV.

7.2 Essai de dureté Vickers

7.2.1 Sélection de la charge

Charge normale : 294,2 N (30 kgf).

Si l'échantillon est mince (< 3 mm), 98,07 N (10 kgf) peuvent être utilisés.

7.2.2 Étapes de test

Placez l'échantillon sur la table du testeur de dureté, en vous assurant que la surface est plane.

Sélectionnez une charge, appliquez-la et maintenez-la enfoncée pendant 10 à 15 secondes.

Mesurer les longueurs des deux diagonales de l'empreinte et prendre la valeur moyenne (précision $\pm 0,001$ mm).

3 points doivent être testés sur chaque échantillon, et la distance entre les centres des indentations adjacentes doit être ≥ 5 fois la longueur de la diagonale.

Calculez la valeur HV et conservez l'entier.

7.3 Essai de dureté Rockwell

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

7.3.1 Sélection de la charge

Charge totale : 588,4 N (60 kgf).

Charge initiale : 98,07 N (10 kgf).

7.3.2 Étapes de test

Placez l'échantillon sur la table du testeur de dureté, en vous assurant que la surface est plane.

Appliquez la charge initiale, puis appliquez la charge totale une fois le pointeur stabilisé, et maintenez pendant 5 à 10 secondes.

Retirez la charge totale et lisez la valeur HRA.

3 points ont été testés sur chaque échantillon, et la distance entre les centres des indentations adjacentes était ≥ 2 mm.

Calculez la valeur HRA moyenne et conservez 1 décimale.

7.4 Traitement des données

trois points de test sont pris comme valeur de dureté finale.

Si l'écart d'un point unique est > 5 % (par exemple, un écart HRA $> 0,5$ ou un écart HV > 50), supprimez-le et testez-le à nouveau.

8 Expression des résultats

La dureté Vickers est exprimée en HV et est exprimée en nombres entiers (tels que HV 1500).

La dureté Rockwell est exprimée en HRA, avec une décimale (par exemple HRA 91,5).

Le rapport d'essai doit inclure :

a) Numéro de norme : GB/T 7997-2017 ; b) Description de l'échantillon : marque, lot, taille ; c) Méthode d'essai : dureté Vickers ou Rockwell ; d) Conditions d'essai : température, humidité, charge ; e) Modèle d'instrument et état d'étalonnage ; f) Résultats : valeur moyenne de la dureté, écart type ; g) Date d'essai : par exemple le 21 mai 2025 ; h) Testeur : signature.

9 Précision et biais

9.1 Précision

Répétabilité : L'écart de dureté mesuré par le même opérateur et le même équipement est < 2 % (ex : HRA $< 0,2$, HV < 30).

Reproductibilité : L'écart de dureté entre les différents laboratoires est < 5 %.

9.2 Biais

Erreur de l'instrument : $\pm 0,5$ % Influence de l'erreur de charge < 1 %.

Surface de l'échantillon : une rugosité $R_a > 0,2$ μm entraîne une sous-estimation de la dureté de 2 à 3 %.

Erreur de fonctionnement : Le résultat peut différer de 1 à 2 % si le pénétrateur n'est pas vertical ou si le temps de chargement est insuffisant.

10 facteurs d'influence

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

10.1 Taille des grains

Les grains fins (0,2-0,5 μm) ont une dureté plus élevée (HRA 91-93), tandis que les grains grossiers (> 5 μm) ont une dureté plus faible (HRA 88-90).

10.2 Teneur en cobalt

L'augmentation de la teneur en cobalt (6 à 15 %) diminue la dureté (le HRA diminue de 1 à 2 unités) en raison de la phase liante plus molle.

10.3

Porosité Une porosité > 0,1 % réduira la dureté de 3 à 5 % et la densité doit être contrôlée à > 99,5 %.

10.4 Qualité de surface

Des rayures ou des microfissures peuvent provoquer des fluctuations locales de dureté de 2 à 3 %.

10.5 Conditions d'essai

Les températures élevées (> 200 °C) réduisent la dureté de 1 à 3 %. L'humidité affecte la dureté de < 1 %.

11 Application des résultats des tests

11.1 Classification des performances

HRA >91 : Convient aux outils à haute dureté (tels que les forets PCB, durée de vie > 4 heures).

HRA 88-91 : Convient aux moules à haute ténacité (tels que les forets miniers, durée de vie > 200 heures).

11.2 Optimisation du procédé

Une faible dureté indique des grains grossiers ou une teneur en cobalt trop élevée. Ajustez les paramètres de frittage (1 350-1 450 °C) ou ajoutez des inhibiteurs de grains (tels que VC 0,2-0,5 % en poids).

11.3 Contrôle qualité

Vérifiez que la dureté répond aux exigences de conception, telles que la cible YG6 HRA 91 \pm 0,5.

11.4 Exemple

Lors de la découpe d'acier aéronautique, l'outil YG8 HRA 90.5 assure une résistance à l'usure et une durée de vie de 3,5 heures.

12 notes

12.1 Étalonnage de l'instrument

Avant le test, étalonnez le testeur de dureté à un écart de < \pm 1 HRA ou \pm 10 HV.

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

12.2 Qualité de l'échantillon

Assurez-vous que la surface de l'échantillon est polie avec une rugosité $Ra \leq 0,2 \mu\text{m}$.

12.3

La température de la salle d'essai est contrôlée à 20-25°C et l'humidité est <60%.

12.4 Protection de sécurité

Évitez les éclaboussures de la tête de pression pendant le fonctionnement et portez des lunettes de protection.

13 Annexe (Annexe informative)

Annexe A Valeurs de dureté typiques

Tableau A.1 Dureté des nuances courantes de carbure cémenté

Marque	Teneur en cobalt (% en poids)	Taille des grains (μm)	Dureté Vickers (HV)	Dureté Rockwell (HRA)
YG6	6	1-2	1500-1600	90,5-91,5
YG8	8	2-3	1400-1500	89,0-90,0
YG10	10	2-4	1300-1400	88,0-89,0

Annexe B Analyse des erreurs

B.1 Erreur de l'instrument

$\pm 0,5 \%$ L'erreur de charge affecte la dureté < 1 %.

B.2 La

rugosité de surface de l'échantillon $Ra 0,4 \mu\text{m}$ entraîne une sous-estimation de la dureté de 2 %.

B.3 Influences environnementales

Une température élevée de 200°C entraîne une diminution de la dureté de 1 à 3 %.

Annexe C Suggestions d'amélioration

C.1 Adopter un testeur de dureté micro-Vickers, adapté aux tests de petites surfaces.

C.2 Utiliser la technologie de nano-indentation pour améliorer la précision des tests de dureté (erreur < 0,5 %). C.3 Introduire un système de test de dureté en ligne pour améliorer l'efficacité de la production.

Annexe D Exemples de données de test

Tableau D.1 Données d'essai de dureté du carbure cémenté YG8

Numéro d'échantillon	Charge (N)	Diagonale d'indentation (mm)	Dureté Vickers (HV)	Dureté Rockwell (HRA)	HRA moyen
YG8-001	294,2	0,135	1450	89,8	89,7

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

Numéro d'échantillon	Charge (N)	Diagonale d'indentation (mm)	Dureté Vickers (HV)	Dureté Rockwell (HRA)	HRA moyen
YG8-002	294,2	0,138	1420	89,5	89,7
YG8-003	294,2	0,136	1440	89,7	89,7

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



GB/T 3850-2015 Méthode de détermination de la masse volumique du carbure cémenté

1 Portée

Cette norme spécifie la méthode de détermination de la masse volumique du carbure cémenté. Cette méthode s'applique aux matériaux et produits en carbure cémenté (tels que YG6, YG8 et autres nuances) dont la phase dure est le carbure de tungstène (WC) et la phase liante le cobalt (Co). La masse volumique (unité : g/cm^3) est déterminée par la méthode du déplacement de liquide ou de gaz. Cette méthode peut être utilisée pour le contrôle qualité en production, l'acceptation des produits et les essais de performance en recherche et développement.

Cette norme ne s'applique pas aux matériaux contenant une porosité importante ou des inclusions non métalliques.

2 Références normatives

Les documents suivants sont essentiels à l'application de la présente norme. Pour tout document référencé daté, seule la version datée s'applique. Pour tout document référencé non daté, la dernière version (y compris tous les amendements) s'applique.

GB/T 3848 Détermination de la teneur en cobalt dans le carbure cémenté

GB/T 3851-2015 Barre d'essai de résistance à la flexion en carbure cémenté

GB/T 1423 Méthode de détermination de la masse volumique des matériaux métalliques

ISO 3369:2006 Méthode de détermination de la masse volumique du carbure cémenté

ISO 3696 Spécification pour l'eau destinée aux laboratoires d'analyse

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

3 Termes et définitions

Les termes et définitions suivants s'appliquent à cette norme.

3.1 Densité :

Masse de carbure cémenté par unité de volume, exprimée en g/cm³, qui reflète la densité et l'uniformité de la composition du matériau.

3.2 Le métal dur est un matériau composite composé de carbure de tungstène (WC)

comme phase dure et de cobalt (Co) comme phase de liaison grâce au procédé de métallurgie des poudres.

3.3 Méthode de déplacement de liquide :

Cette méthode utilise le principe d'Archimède pour déterminer le volume d'un échantillon en le déplaçant avec un liquide (généralement de l'eau ou de l'éthanol).

3.4 Méthode de déplacement de gaz :

Méthode de mesure du volume de l'échantillon en déplaçant un gaz inerte (tel que l'hélium).

4 Principe

La détermination de la masse volumique du carbure cémenté repose sur la relation entre masse et volume. La méthode de déplacement de liquide utilise le principe d'Archimède pour calculer le volume et la masse volumique en mesurant la masse de l'échantillon dans l'air et la masse en suspension dans le liquide :

$$\rho = \frac{m_1}{m_1 - m_2} \times \rho_0$$

其中：

- ρ : 试样密度 (g/cm³);
- m_1 : 试样在空气中的质量 (g);
- m_2 : 试样在液体中的悬浮质量 (g);
- ρ_0 : 液体密度 (g/cm³).

La méthode de remplacement de gaz utilise la différence de volume du gaz inerte à l'intérieur et à l'extérieur de l'échantillon pour calculer le volume de l'échantillon, puis déterminer la masse volumique en fonction de la masse. La porosité et l'adsorption de surface influencent les résultats ; les conditions d'essai doivent donc être rigoureusement contrôlées.

5. Instruments et équipements

5.1 Balance analytique

Précision $\pm 0,0001$ g, utilisée pour mesurer la masse de l'échantillon.

Equippé d'un dispositif de suspension, adapté au remplacement du liquide.

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

5.2 Densimètre

Densimètre à déplacement de liquide, précision $\pm 0,01$ g/cm³.

Densimètre à déplacement de gaz (tel que densimètre à hélium), précision $\pm 0,001$ g/cm³.

5.3 Bain-marie à température constante

La plage de contrôle de la température est de 20 à 25 °C, avec une précision de $\pm 0,1$ °C.

5.4 Nettoyeur à ultrasons

Utilisé pour nettoyer la surface de l'échantillon et éliminer les taches d'huile et les bulles.

5.5 Bécher ou cylindre gradué

Capacité 50 mL ou 100 mL, conformément à la norme ISO 4788.

5.6 Étuve de séchage

Température 105°C, utilisée pour le séchage des échantillons.

6 réactifs

6.1 Eau déionisée

Conforme à la norme ISO 3696 sur l'eau primaire, densité 0,9982 g/cm³ (20°C).

6.2 Éthanol

Qualité analytique, concentration $\geq 99,5$ %, densité 0,7893 g/cm³ (20 °C).

6.3 Gaz inertes

Hélium de haute pureté (99,999 %), utilisé pour la méthode de remplacement du gaz.

7 spécimens

7.1 Exigences relatives à l'échantillon

Forme : cube, cylindre ou bloc irrégulier, longueur du côté ou diamètre ≥ 5 mm, masse ≥ 5 g.

Etat de surface : Surface lisse, exempte de fissures (< 5 μm), de pores (porosité $< 0,05\%$) ou de taches d'huile, polie si nécessaire.

Homogénéité : écart de composition $< 0,1$ % en poids, fluctuation de la granulométrie < 5 %.

Quantité : Pas moins de 3 spécimens par lot.

7.2 Préparation des échantillons

Découper les échantillons à partir d'ébauches en carbure ou de produits finis pour éviter d'introduire des contraintes (< 100 MPa).

Utilisez une meule diamantée ou une polisseuse pour traiter la surface, avec une rugosité $R_a \leq 0,4$ μm .

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

Les échantillons ont été nettoyés par ultrasons dans de l'éthanol pendant 5 minutes, séchés (105 °C, 30 minutes) et refroidis à température ambiante.

8 Méthodes d'essai

8.1 Méthode de remplacement du liquide

8.1.1 Conditions d'essai

Température du liquide : $20 \pm 0,5$ °C, enregistrer la densité du liquide (eau 0,9982 g/cm³, éthanol 0,7893 g/cm³).

Humidité ambiante : <60%.

8.1.2 Étapes de test

Peser la masse de l'échantillon dans l'air avec une précision de $\pm 0,0001$ g.

L'échantillon est suspendu dans un fil fin, immergé dans de l'eau déionisée ou de l'éthanol, et la masse en suspension est pesée.

Assurez-vous qu'il n'y a pas de bulles adhérant à l'échantillon et éliminez-les avec des ultrasons si nécessaire.

Répétez la mesure 3 fois et prenez la valeur moyenne.

Calculer la densité : $\rho = \frac{m_1 - m_2}{V}$

8.2 Méthode de déplacement de gaz

8.2.1 Conditions d'essai

Température : $20 \pm 0,5$ °C, pression stable.

Étalonnage de l'instrument : Étalonner à l'aide d'échantillons standard.

8.2.2 Étapes de test

Placez l'échantillon dans la chambre d'échantillon du densimètre et fermez-la hermétiquement.

De l'hélium de haute pureté est introduit et le volume de l'échantillon est mesuré (précision $\pm 0,01$ cm³).

Peser la masse de l'échantillon (m_1) avec une précision de $\pm 0,0001$ g.

Calculer la densité : $\rho = \frac{m_1}{V}$

Où V est le volume mesuré par déplacement de gaz (cm³).

Répétez la mesure 3 fois et prenez la valeur moyenne.

8.3 Traitement des données

trois échantillons ont été prélevés comme résultat final.

Si l'écart d'un seul point est $> 0,5$ % (par exemple, 14,90 g/cm³ passe à 15,00 g/cm³), supprimez-le et recalculiez.

Les écarts types sont indiqués à $\pm 0,1$ %.

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

9 Expression des résultats

est exprimé en g/cm^3 avec 2 décimales (par exemple $14,95 \text{ g/cm}^3$).

Le rapport d'essai doit inclure :

- a) Numéro de norme : GB/T 3850-2015 ; b) Description de l'échantillon : marque, lot, taille ; c) Méthode d'essai : méthode de déplacement de liquide ou méthode de déplacement de gaz ; d) Conditions d'essai : température, humidité, type de liquide/gaz ; e) Modèle d'instrument et état d'étalonnage ; f) Résultats : valeur moyenne de la densité, écart type ; g) Date d'essai : par exemple le 21 mai 2025 ; h) Testeur : signature.

10 Précision et biais

10.1 Précision

Répétabilité : L'écart de densité mesuré par le même opérateur et le même équipement est $< 0,2 \%$.

Reproductibilité : L'écart de densité entre les différents laboratoires est $< 0,5 \%$.

10.2 Biais

Erreur de l'instrument : $\pm 0,01 \text{ g/cm}^3$ (méthode liquide), $\pm 0,001 \text{ g/cm}^3$ (méthode gazeuse).

Surface de l'échantillon : l'adhérence des bulles ou les taches d'huile entraînent une sous-estimation de la densité de $0,1$ à $0,3 \%$.

Température du liquide : $\pm 1^\circ\text{C}$ L'écart de température affecte la densité de $< 0,02 \%$.

11 facteurs d'influence

11.1 Porosité Une

porosité $> 0,1 \%$ réduira la densité de $0,2$ à $0,5 \text{ g/cm}^3$ et la densité doit être contrôlée à $> 99,5 \%$.

11.2 Teneur en cobalt

L'augmentation de la teneur en cobalt ($6-15 \%$) augmente la densité (environ $0,1 \text{ g/cm}^3 / 5 \%$ Co), mais est affectée par le bilan carbone.

11.3 Taille des grains

Les grains fins ($0,2-0,5 \mu\text{m}$) ont une densité légèrement plus élevée ($< 0,1 \text{ g/cm}^3$), tandis que les grains grossiers ($> 5 \mu\text{m}$) ont une densité plus faible en raison de l'influence des pores.

11.4 État de surface

Une surface non polie ou des microfissures entraînent des fluctuations de densité de $0,05$ à $0,1 \text{ g/cm}^3$.

11.5 Conditions d'essai

Une température élevée ($> 50^\circ\text{C}$) ou une humidité élevée ($> 70 \%$) peuvent entraîner des changements de densité du liquide de $< 0,1 \%$.

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

12 Application des résultats des tests

12.1 Contrôle qualité

Vérifiez que la densité répond aux exigences de conception, telles que l'objectif de YG6 est de $14,90 \pm 0,10 \text{ g/cm}^3$.

12.2 Optimisation du procédé

Une faible densité indique un frittage insuffisant ou une porosité élevée. Ajuster la température (1 350-1 450 °C) ou la pression.

12.3 Prédiction des performances

Une densité $> 14,8 \text{ g/cm}^3$ correspond à une dureté élevée (HRA > 90), tandis qu'une densité $< 14,5 \text{ g/cm}^3$ indique une ténacité réduite.

12.4 Exemple

Dans la production de forets en eaux profondes, la densité YG8 de $14,70 \text{ g/cm}^3$ garantit une dureté HRA 90 et une durée de vie > 300 heures.

13 notes

13.1 Étalonnage de l'instrument

Avant le test, étalonnez le densimètre à un écart de $< \pm 0,01 \text{ g/cm}^3$.

13.2 Qualité de l'échantillon

: Assurez-vous que l'échantillon ne contient pas de bulles et que la surface est polie.

13.3 La température de la salle d'essai est contrôlée à

$20\text{-}25^\circ\text{C}$ et l'humidité est $< 60\%$.

13.4 Protection de sécurité

Évitez les éclaboussures de liquide pendant le fonctionnement et portez des lunettes de protection.

14 Annexe (Annexe informative)

Annexe A Valeurs de densité typiques

Tableau A.1 Densité des nuances courantes de carbure cémenté

Marque	Teneur en cobalt (% en poids)	Taille des grains (μm)	Densité (g/cm^3)
YG6	6	1-2	14,85-14,95
YG8	8	2-3	14,65-14,75
YG10	10	2-4	14h40-14h50

Annexe B Analyse des erreurs

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

B.1 Erreur de l'instrument :

$\pm 0,01 \text{ g/cm}^3$ (méthode liquide), $\pm 0,001 \text{ g/cm}^3$ (méthode gazeuse).

B.2 Un défaut d'échantillon

de porosité de 0,1 % entraîne une chute de densité de $0,2 \text{ g/cm}^3$.

B.3 L'influence de

la température environnementale $\pm 1^\circ\text{C}$ provoque un écart de densité $< 0,02\%$.

Annexe C Suggestions d'amélioration

C.1 Utiliser un densimètre à gaz de haute précision avec une erreur de $< \pm 0,0005 \text{ g/cm}^3$. C.2

Utiliser le séchage sous vide pour éliminer les bulles de surface et améliorer la cohérence des mesures. C.3 Introduire la tomographie à rayons X (CT) pour détecter les pores internes.

Annexe D Exemples de données de test

Tableau D.1 Données d'essai de densité du carbure cémenté YG8

Numéro d'échantillon	Qualité de l'air (g)	Masse en suspension (g)	Densité (g/cm^3)	Valeur moyenne (g/cm^3)
YG8-001	5.123	4.578	14,72	14,70
YG8-002	5.126	4.582	14,69	14,70
YG8-003	5.125	4.580	14,70	14,70



GB/T 18376-2014 Méthode d'essai de la microstructure du carbure cimenté

1 Portée

Cette norme spécifie les méthodes de préparation, d'observation et d'évaluation de la microstructure du carbure cimenté. Cette méthode s'applique aux matériaux et produits en carbure cimenté (tels que YG6, YG8 et autres nuances) dont la phase dure est le carbure de tungstène (WC) et la phase liante le cobalt (Co). Les caractéristiques de la microstructure, notamment la granulométrie, la composition des phases, la porosité et les défauts, sont analysées au microscope optique ou au microscope électronique à balayage (MEB). Cette méthode peut être utilisée pour le contrôle qualité en production, l'acceptation des produits et l'évaluation des performances en recherche et développement.

Cette norme ne s'applique pas aux carbures cimentés sans cobalt ni aux matériaux non métalliques.

2 Références normatives

Les documents suivants sont essentiels à l'application de la présente norme. Pour tout document référencé daté, seule la version datée s'applique. Pour tout document référencé non daté, la dernière version (y compris tous les amendements) s'applique.

GB/T 3848 Détermination de la teneur en cobalt dans le carbure cimenté

GB/T 3850-2015 Méthode de détermination de la masse volumique du carbure cimenté

GB/T 13298-2015 Méthodes d'inspection de la microstructure métallique

GB/T 4338 Méthode de corrosion des microstructures métalliques

ISO 4499-2:2008 Méthodes d'essai de la microstructure du carbure cimenté Partie 2 : Analyse quantitative des phases

ISO 3696 Spécification pour l'eau destinée aux laboratoires d'analyse

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

3 Termes et définitions

Les termes et définitions suivants s'appliquent à cette norme.

3.1 Microstructure

Les caractéristiques structurales du carbure cémenté à l'échelle microscopique, y compris la taille des grains, la distribution des phases, les pores et les défauts.

3.2 Le métal dur est un matériau composite composé de carbure de tungstène (WC)

comme phase dure et de cobalt (Co) comme phase de liaison grâce au procédé de métallurgie des poudres.

3.3 Taille des grains

Le diamètre moyen des grains de la phase dure (WC), généralement en μm .

3.4 Porosité :

La fraction volumique des pores dans le carbure cémenté, reflétant la densité du matériau, avec l'unité de %.

La phase η 3,5 (phase Êta)

est une phase fragile résultant d'une teneur insuffisante en carbone. Sa formule chimique est $\text{Co}_3\text{W}_3\text{C}$, ce qui peut affecter les performances.

3.6 Carbone libre :

Carbone précipité en raison d'une teneur excessive en carbone, affectant l'uniformité de la microstructure.

4 Principe

L'inspection de la microstructure du carbure cémenté s'effectue par la préparation de l'échantillon, la corrosion et l'observation microscopique afin d'analyser ses caractéristiques structurales internes. Au cours du processus de préparation, l'échantillon est découpé, meulé et poli, puis sa microstructure est analysée avec un agent de gravure (tel que le réactif de Murakami), puis observée au microscope optique (grossissement 100x-1000x) ou au microscope électronique à balayage (MEB). La granulométrie est mesurée par la méthode de la section transversale, tandis que la porosité et la composition des phases sont évaluées quantitativement par analyse d'image. Les caractéristiques microstructurales sont étroitement liées au processus de frittage, au bilan carbone et aux défauts, et peuvent refléter les propriétés du matériau.

5. Instruments et équipements

5.1 Microscope optique

Grossissement 100x-1000x, équipé d'un système d'analyse d'image, précision $\pm 0,1 \mu\text{m}$.

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

5.2 Microscopie électronique à balayage (MEB)

La résolution est $\leq 0,1 \mu\text{m}$ et un spectromètre dispersif en énergie (EDS) est utilisé pour l'analyse de phase.

5.3 Machine de découpe

Équipé d'une meule diamantée et d'une lubrification par liquide de refroidissement pour éviter les dommages thermiques.

5.4 Machine à poncer et à polir

Équipé de papier de verre SiC (#200-#1200) et de suspension diamantée (granulométrie 1-3 μm), rugosité de surface $R_a \leq 0,05 \mu\text{m}$.

5.5 Nettoyeur à ultrasons

Utilisé pour le nettoyage des échantillons et l'élimination des matériaux de broyage résiduels.

5.6 Boîte à température constante

Contrôlez la température de séchage à 105°C avec une précision de $\pm 2^\circ\text{C}$.

6 réactifs

6.1 Eau déionisée

Conforme à la norme ISO 3696 Grade 1 sur l'eau.

6.2 Réactif de Murakami

Formule : $10 \text{ g K}_3[\text{Fe}(\text{CN})_6] + 10 \text{ g KOH} + 100 \text{ mL H}_2\text{O}$, temps de corrosion 5 à 30 secondes, selon la réaction de l'échantillon.

6.3 Éthanol

Qualité analytique, concentration $\geq 99,5 \%$, utilisé pour le nettoyage.

7 spécimens

7.1 Exigences relatives à l'échantillon

Forme : rectangulaire ou cylindrique, taille $\geq 10 \text{ mm} \times 10 \text{ mm} \times 5 \text{ mm}$, masse $\geq 5 \text{ g}$.

Etat de surface : pas de fissures ($< 5 \mu\text{m}$), de pores (porosité $< 0,05\%$) ni de couche d'oxyde.

Homogénéité : écart de composition $< 0,1 \%$ en poids, fluctuation de la granulométrie $< 5 \%$.

Quantité : Pas moins de 3 échantillons par lot, hautement représentatifs.

7.2 Préparation des échantillons

Découpe : La découpe est réalisée avec une meule diamantée perpendiculaire à la direction de frittage, lubrifiée avec du liquide de refroidissement, à une vitesse $< 500 \text{ tr/min}$.

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

Meulage : utilisez du papier de verre SiC n° 200, n° 400, n° 800 et n° 1200 en séquence, appliquez une pression de 20 à 30 N et le temps est de 2 à 3 minutes/niveau.

Polissage : Utiliser une suspension de diamant de 1 à 3 μm et un chiffon en flanelle pendant 5 à 10 minutes, surface $R_a \leq 0,05 \mu\text{m}$.

Nettoyage et séchage : Nettoyage par ultrasons à l'éthanol pendant 5 min, séchage à 105°C pendant 30 min, puis refroidissement à température ambiante.

8 Affichage de la microstructure

8.1 Corrosion

Utilisez le réactif de Murakami pour corroder la surface de l'échantillon pendant 5 à 30 secondes (WC est marron, Co est blanc et la phase η est grise), observez la réaction et ajustez le temps si nécessaire.

Après corrosion, rincer à l'eau déionisée, déshydrater à l'éthanol et sécher immédiatement.

8.2 Inspection

Assurez-vous que la corrosion est uniforme sans sur-corrosion (limites de grains floues) ou sous-corrosion (absence de microstructure).

9 Inspection de la microstructure

9.1 Méthodes d'observation

Microscope optique : grossissement 500x-1000x, observation de la granulométrie, de la distribution de phase, des pores et des défauts.

MEB : grossissement 1000x-5000x, combiné à l'EDS pour analyser la composition des phases.

9.2 Mesure de la granulométrie

Selon la méthode de la section transversale (ISO 4499-2), 100 grains de WC ont été mesurés au hasard dans 10 champs de vision, et le diamètre a été moyenné avec une précision de $\pm 0,1 \mu\text{m}$.

Indiquez la taille moyenne des grains et la plage de distribution.

9.3 Évaluation de la porosité

Selon la norme GB/T 13298-2015, le nombre et la surface des pores sont comptés et classés :

Type A : petits pores ($<10 \mu\text{m}$) ;

Type B : macropores ($10-25 \mu\text{m}$) ;

Type C : agrégats ($>25 \mu\text{m}$).

Porosité = surface des pores/surface totale $\times 100 \%$, conserver 2 décimales.

9.4 Analyse de la composition des phases

Identifiez les phases WC, Co, η , carbone libre et analysez quantitativement le pourcentage de surface de chaque phase avec un écart de $<1 \%$.

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

9.5 Inspection des défauts

Détectez les fissures et les inclusions (telles que Fe, Ni) et enregistrez leur emplacement, leur taille et leur distribution.

10. Expression du résultat

La granulométrie est exprimée en μm avec une décimale (par exemple 0,8 μm).

La porosité est exprimée en %, avec 2 décimales (ex : 0,05%).

La composition des phases est exprimée en pourcentage de surface avec une décimale (par exemple WC 90,5 %).

Le rapport d'essai doit inclure :

- a) Numéro de norme : GB/T 18376-2014 ; b) Description de l'échantillon : marque, lot, taille ; c) Conditions de préparation : découpe, meulage, polissage ; d) Conditions d'observation : grossissement, agent corrosif ; e) Résultats : granulométrie, porosité, composition de phase, défauts ; f) Date de l'essai : par exemple le 21 mai 2025 ; g) Testeur : signature.

11 Précision et biais

11.1 Précision

Répétabilité : L'écart de granulométrie mesuré par le même opérateur et le même équipement est inférieur à 5 %, et l'écart de porosité est inférieur à 0,02 %.

Reproductibilité : L'écart de granulométrie mesuré par différents laboratoires est <10% et l'écart de porosité est <0,05%.

11.2 Biais

Erreur de l'instrument : erreur de mesure du microscope $\pm 0,1 \mu\text{m}$, erreur SEM < 0,01 μm .

Erreur de préparation : les rayures de meulage ou la surgravure peuvent surestimer la taille des grains de 5 à 10 %.

Inhomogénéité de l'échantillon : un écart de composition $\geq 0,1$ % en poids entraîne une fluctuation de la porosité de 0,1 à 0,2 %.

12 facteurs d'influence

12.1 Processus de frittage

La température (1350-1500°C) affecte la croissance des grains, et >1450°C produit des grains grossiers (>2 μm).

Le pressage isostatique à chaud (HIP, 150 MPa) a réduit la porosité (< 0,01 %).

12.2 Bilan carbone

Le carbone insuffisant forme la phase η (gris, 5-10 %), tandis que l'excès de carbone précipite le carbone libre (noir, < 2 %).

12.3 Taille des grains

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

Les grains fins (0,2-0,5 μm) ont une faible porosité ($< 0,05\%$), tandis que les grains grossiers ($> 5\ \mu\text{m}$) ont une porosité élevée ($> 0,1\%$).

12.4 Défauts

Les inclusions (par exemple Fe 0,1%) entraînent une porosité locale et des fissures affectant $< 0,05\ \text{mm}$.

13 Application des résultats des tests

13.1 Contrôle de la qualité

La granulométrie est de 0,5 à 1,0 μm et la porosité est $< 0,05\%$, ce qui répond à la norme YG6.

13.2 Optimisation des processus

Une porosité $> 0,1\%$ indique un frittage insuffisant, ajustez la température (1400°C) ou la pression.

13.3 Prédiction des performances

L'affinement du grain ($< 0,5\ \mu\text{m}$) augmente la dureté (HRA > 91), tandis que l'augmentation de la phase η réduit la ténacité.

13.4 Exemples

Outil YG8, granulométrie 1,0 μm , porosité 0,03 %, assure une durée de vie de coupe > 3 heures.

14 Notes

14.1 Étalonnage de l'instrument

Le microscope a été calibré avant le test, avec une erreur de $\leq \pm 0,1\ \mu\text{m}$.

14.2 Qualité de l'échantillon

Assurez-vous qu'il n'y a pas de rayures sur la surface de l'échantillon et que la corrosion est uniforme.

14.3 Contrôle environnemental

La température de la salle d'essai était de 20 à 25 °C et l'humidité était $< 60\%$.

14.4 Protection de sécurité

Portez des lunettes de protection pendant le fonctionnement pour éviter les éclaboussures de liquide corrosif.

15 Annexe (Annexe informative)

Annexe A Paramètres de microstructure typiques

Tableau A.1 Caractéristiques microstructurales des nuances courantes de carbure cémenté

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

Marque	Teneur en cobalt (% en poids)	Taille des grains (μm)	Porosité(%)	Composition de la phase principale (%)
YG6	6	0,6-0,8	0,02-0,05	WC 90, Co 10
YG8	8	0,8-1,0	0,03-0,06	WC 88, Co 12
YG10	10	1,0-1,2	0,04-0,07	WC 86, Co 14

Annexe B Analyse des erreurs

B.1 Erreur de l'instrument

L'erreur de mesure du microscope est de $\pm 0,1 \mu\text{m}$, ce qui affecte la taille des grains de $< 1 \%$.

B.2 Défauts de préparation

La surcorrosion entraîne une surestimation de la porosité de 0,05 à 0,1 %.

B.3 Impact environnemental

L'humidité $> 70 \%$ provoque une oxydation de surface, affectant la reconnaissance de phase.

Annexe C Suggestions d'amélioration

C.1 Utiliser un système d'analyse d'image automatique pour améliorer la précision de la mesure de la granulométrie ($< 0,05 \mu\text{m}$).

C.2 Utiliser le SEM-EDS pour détecter les traces de phase η , avec une erreur quantitative de $< 0,5 \%$.

C.3 Introduire la diffraction des rayons X (DRX) pour vérifier la cohérence de la composition des phases.

Annexe D Exemples de données de test

Tableau D.1 Données d'essai de la microstructure du carbure cimenté YG8

Numéro d'échantillon	Taille des grains (μm)	Porosité(%)	WC (%)	Co (%)	phase η (%)
YG8-001	0,9	0,04	88,2	11,6	0,2
YG8-002	0,8	0,03	88,5	11,4	0,1
YG8-003	0,9	0,05	88,0	11,8	0,2

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

GB/T 5314-2011 Poudres pour la métallurgie des poudres Méthodes d'échantillonnage - Composition chimique

1 Portée

Cette section décrit la méthode de détermination de la composition chimique des poudres pour la métallurgie des poudres après échantillonnage. Cette méthode s'applique aux poudres métalliques (telles que la poudre de fer, la poudre de cuivre, la poudre de tungstène, la poudre de cobalt, etc.) et aux poudres d'alliages pour la métallurgie des poudres. Elle vise à déterminer leur composition chimique par analyse chimique, notamment la teneur en éléments principaux (tels que Fe, Cu, W, Co, etc.) et en impuretés (tels que C, O, S, P, etc.). Cette méthode peut être utilisée pour le contrôle qualité, la réception en production et la vérification des composants en recherche et développement.

Cette norme ne s'applique pas aux poudres non métalliques ni aux nanopoudres ultrafines dont la granulométrie est inférieure à 10 µm (il convient de se référer à GB/T 33822-2017).

2 Références normatives

Les documents suivants sont essentiels à l'application de la présente norme. Pour tout document référencé daté, seule la version datée s'applique. Pour tout document référencé non daté, la dernière version (y compris tous les amendements) s'applique.

GB/T 223.1 Méthodes d'analyse chimique du fer, de l'acier et des alliages - Méthode de titrage pour la détermination de la teneur en fer

GB/T 223.3 Méthodes d'analyse chimique du fer, de l'acier et des alliages - Détermination de la teneur en phosphore - Méthode gravimétrique au phosphomolybdate de dianthrone

GB/T 223.4 Méthodes d'analyse chimique du fer, de l'acier et des alliages - Détermination de la teneur en manganèse - Méthode de titrage potentiométrique ou de titrage visuel

GB/T 223.5 Méthodes d'analyse chimique des aciers et alliages - Détermination de la teneur en silicium - Méthode photométrique au bleu de silicium-molybdène

GB/T 223.9 Méthodes d'analyse chimique du fer, de l'acier et des alliages - Détermination de la teneur en soufre - Méthode de titrage à l'iode

GB/T 223.23 Méthodes d'analyse chimique du fer, de l'acier et des alliages - Détermination de la teneur en cobalt - Méthode photométrique

GB/T 223.58 Méthodes d'analyse chimique du fer, de l'acier et des alliages - Détermination de la teneur en tungstène - Méthode gravimétrique par réduction

GB/T 4336 Méthode d'analyse par spectrométrie d'émission atomique par décharge d'étincelles pour l'acier au carbone et l'acier faiblement allié

GB/T 5314-2011 Méthode d'échantillonnage de poudre pour la métallurgie des poudres

ISO 4490 Principes généraux d'échantillonnage et d'analyse chimique des poudres métalliques

3 Termes et définitions

Les termes et définitions suivants s'appliquent à cette norme.

3.1 Composition chimique Pourcentage massique (

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

% en poids) de divers éléments dans la poudre de métallurgie des poudres, y compris les éléments principaux et les éléments d'impureté.

3.2 Échantillonnage

Le processus d'extraction d'échantillons représentatifs d'un lot de poudre est réalisé conformément à la norme GB/T 5314-2011.

3.3 Éléments d'impureté :

oligo-éléments tels que le carbone (C), l'oxygène (O), le soufre (S), le phosphore (P), etc. qui ont un effet néfaste sur les propriétés de la poudre.

3.4 Poudres pour la métallurgie des

poudres Poudres de métaux ou d'alliages préparées par atomisation, réduction ou méthodes chimiques et utilisées pour les procédés de pressage et de frittage.

4 Principe

La détermination de la composition chimique s'effectue par dissolution ou analyse directe de la poudre après échantillonnage, puis par analyse chimique (titrage, méthode pondérale) ou instrumentale (spectroscopie) pour déterminer la teneur en chaque élément. Les éléments principaux (Fe, Cu, W, Co) sont quantifiés par des méthodes standard, tandis que les impuretés (C, O) sont déterminées par des instruments spécifiques. La qualité et l'uniformité de l'échantillonnage influencent directement la précision des résultats, et les exigences de la norme GB/T 5314-2011 en la matière doivent être strictement respectées.

5. Instruments et équipements

5.1 Balance analytique

Précision $\pm 0,0001$ g, utilisée pour peser des échantillons.

5.2 Spectromètre d'émission optique à plasma à couplage inductif (ICP-OES)

Plage de mesure : niveau ppm au niveau % en poids, précision $\pm 0,1$ %.

5.3 Analyseur de carbone et de soufre

Déterminer la teneur en C et S avec une précision de $\pm 0,001$ % en poids.

5.4 Analyseur d'oxygène et d'azote

Déterminer la teneur en O et N avec une précision de $\pm 0,0005$ % en poids.

5.5 Appareil de titrage

Equippé d'un titrateur potentiométrique ou d'un titrateur automatique, précision $\pm 0,01$ mL.

5.6 Four à haute température

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

Plage de température 1000-1500°C, utilisée pour la fusion ou la combustion d'échantillons.

5.7 Nettoyeur à ultrasons

Utilisé pour le nettoyage des échantillons et l'élimination de la contamination de surface.

6 réactifs

6.1 Acide nitrique (HNO₃)

Qualité analytique, concentration 65%-68%.

6.2 Acide chlorhydrique (HCl)

Qualité analytique, concentration 36%-38%.

6.3 Acide sulfurique (H₂SO₄)

Qualité analytique, concentration 95%-98%.

6.4 Solution standard

Tels que la solution standard Fe, Cu, W, Co, concentration 0,01 mol/L, conformément à GB/T 601.

6.5 Eau déionisée

Conforme à la norme ISO 3696 Grade 1 sur l'eau.

6.6 Flux

Tels que la poudre de Na₂CO₃ ou de Fe, utilisée pour faire fondre des échantillons.

7 Échantillonnage

7.1 Méthode d'échantillonnage

Conformément à la norme GB/T 5314-2011, des échantillons représentatifs sont extraits de lots de poudre à l'aide d'un échantillonnage stratifié ou d'un échantillonnage mécanique.

Points d'échantillonnage : au moins 5 points, mélanger et emballer.

7.2 Taille de l'échantillon

Prélever 50 à 100 g d'échantillon total de chaque lot et 0,5 à 2 g d'échantillon pour analyse.

7.3 Stockage des échantillons

Conserver dans un récipient hermétique pour éviter l'oxydation ou l'absorption d'humidité.

8 Méthodes d'essai

8.1 Préparation des échantillons

Pesez 0,5 à 2 g de poudre (précision ± 0,0001 g) et placez-la dans un creuset.

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

Ajoutez une quantité appropriée de flux (tel que Na_2CO_3 5 g), faites-le fondre dans un four à haute température à 1000-1200 °C pendant 30 minutes et dissolvez-le dans de l'acide dilué ($\text{HNO}_3 : \text{H}_2\text{O} = 1:1$) après refroidissement.

le volume a été complété à 100 mL avec de l'eau déionisée.

8.2 Détermination des principaux éléments

Fer (Fe) : Selon la méthode de titrage GB/T 223.1, précision $\pm 0,01$ % en poids.

Cuivre (Cu) : Selon la méthode de titrage de l'iode GB/T 223.7, précision $\pm 0,01$ % en poids.

Tungstène (W) : Selon la méthode de réduction du poids GB/T 223.58, précision $\pm 0,05$ % en poids.

Cobalt (Co) : Selon la méthode photométrique GB/T 223.23, précision $\pm 0,02$ % en poids.

8.3 Détermination des éléments d'impureté

Carbone (C) : utilisant un analyseur de carbone-soufre, méthode de combustion à haute fréquence, précision $\pm 0,001$ % en poids.

Soufre (S) : Identique à l'analyseur de soufre au carbone, précision $\pm 0,0005$ % en poids.

Oxygène (O) : utilisant un analyseur d'oxygène et d'azote, méthode d'absorption infrarouge de fusion, précision $\pm 0,0005$ % en poids.

Phosphore (P) : Selon la méthode de pesée du dianthrone phosphomolybdate GB/T 223.3, précision $\pm 0,001$ % en poids.

8.4 Analyse instrumentale (facultatif)

L'ICP-OES a été utilisé pour déterminer simultanément plusieurs éléments en utilisant la méthode de la courbe d'étalonnage avec une précision de $\pm 0,1$ % (élément principal) et ± 10 ppm (impuretés). La solution d'échantillon est injectée directement et la longueur d'onde de mesure est sélectionnée en fonction de la norme.

8.5 Test à blanc

Effectuez un essai à blanc de la même manière, sans ajouter d'échantillon, et déduisez la valeur à blanc.

8.6 Traitement des données

La moyenne de trois mesures a été prise comme résultat final.

Si l'écart d'un seul point est > 5 % (par exemple, Fe 98 % passe à 103 %), supprimez-le et recalculiez.

Les résultats sont exprimés en % en poids avec 2 décimales.

9 Expression des résultats

La composition chimique est exprimée en pourcentage massique (wt %) avec 2 décimales (par exemple Fe 98,50 %, C 0,02 %).

Le rapport d'essai doit inclure :

- Numéro de norme : GB/T 5314-2011 ;
- Description de l'échantillon : type de poudre, lot, taille des particules ;
- Méthode d'échantillonnage : conformément à GB/T 5314-2011 ;
- Conditions d'essai : température, humidité ;
- Modèle d'instrument et état d'étalonnage ;
- Résultats : contenu

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

et écart de chaque élément ; g) Date d'essai : par exemple le 21 mai 2025 ; h) Testeur : signature.

10 Précision et biais

10.1 Précision

Répétabilité : L'écart de composition mesuré par le même opérateur et le même équipement est $< 0,5\%$ (élément principal) et $< 0,01\%$ (impureté).

Reproductibilité : L'écart de composition mesuré par différents laboratoires est $< 1\%$ (élément principal) et $< 0,02\%$ (impureté).

10.2 Biais

Erreur de l'instrument : erreur ICP-OES $\pm 0,1\%$, erreur de l'instrument carbone-soufre $\pm 0,001\%$.

Erreur d'échantillonnage : la non-uniformité entraîne un écart de $0,5$ à 1% .

Contamination de l'échantillon : l'oxydation de surface entraîne une surestimation de la teneur en oxygène de $0,01$ à $0,05\%$.

11 facteurs d'influence

11.1 Distribution granulométrique

une taille de particules $< 45\ \mu\text{m}$ s'oxyde facilement et la teneur en oxygène augmente de $0,02$ à $0,05\%$.

11.2 Conditions de stockage

Une humidité élevée ($> 70\%$) provoque une absorption d'humidité de surface, affectant la détermination du C et de l'O de $0,01$ à $0,03\%$.

11.3 Processus de fusion

Une température trop élevée ($> 1200^\circ\text{C}$) provoque une volatilisation des éléments (par exemple perte de Co de $0,1\%$).

11.4 Sources d'impuretés

Une faible pureté des matières premières (telles que l'impureté Fe S $> 0,02\%$) affecte les résultats.

12 Application des résultats des tests

12.1 Contrôle de la qualité

Vérifiez si la composition répond aux spécifications, telles que poudre de Fe Fe $\geq 98\%$, C $\leq 0,02\%$.

12.2 Optimisation des processus

Une teneur en oxygène $> 0,1\%$ indique une réduction insuffisante, ajustez la température (800 - 1000°C).

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

12.3 Prédiction des performances

Une teneur en S < 0,01 % et une teneur en P < 0,02 % garantissent des performances de frittage stables.

12.4 Exemples

La poudre de tungstène $W \geq 99,9 \%$, $O < 0,05 \%$ est utilisée pour les alliages à haute densité avec une densité de $19,2 \text{ g/cm}^3$.

13 notes

13.1 Étalonnage de l'instrument

L'instrument d'analyse a été étalonné avant le test, avec un écart de $\leq \pm 0,1\%$.

13.2 Qualité de l'échantillon

Assurez-vous que les échantillons sont exempts de contamination et stockés au sec.

13.3 Contrôle environnemental

La température de la salle d'essai était de 20 à 25 °C et l'humidité était < 60 %.

13.4 Protection de sécurité

Portez des lunettes de protection pendant le fonctionnement pour éviter les éclaboussures d'acide.

14 Annexe (Annexe informative)

Annexe A Plages de composition chimique typiques

Tableau A.1 Composition chimique des poudres courantes de la métallurgie des poudres

Type de poudre	Composant principal (% en poids)	Limite supérieure des impuretés (% en poids)
éventail en fer	$Fe \geq 98,0$	$C \leq 0,02, O \leq 0,1, S \leq 0,01$
Poudre de cuivre	$Cu \geq 99,0$	$O \leq 0,1, Fe \leq 0,1$
Poudre de tungstène	$W \geq 99,9$	$C \leq 0,01, O \leq 0,05$
Poudre de cobalt	$Co \geq 99,5$	$Fe \leq 0,1, O \leq 0,1$

Annexe B Analyse des erreurs

B.1 Erreur de l'instrument

Erreur ICP-OES $\pm 0,1\%$, impact sur les éléments principaux < 0,1%.

B.2 Erreur d'échantillonnage

L'inhomogénéité entraîne un écart de 0,5 à 1 % en Fe.

B.3 Impact environnemental

Une humidité > 70 % a surestimé la teneur en O de 0,02 %.

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

Annexe C Suggestions d'amélioration

C.1 Utiliser la méthode de fusion sous vide pour réduire l'écart de détermination de la teneur en oxygène.

C.2 Utiliser l'ICP-MS de haute précision pour détecter les traces d'impuretés (< 1 ppm). C.3 Introduire un système d'échantillonnage automatique pour améliorer l'uniformité.

Annexe D Exemples de données de test

Tableau D.1 Données d'essai de composition chimique de la poudre de fer

Numéro d'échantillon	Fe (% en poids)	C (% en poids)	O (% en poids)	S (% en poids)	Teneur moyenne en Fe (% en poids)
Fe-001	98,52	0,015	0,082	0,008	98,50
Fe-002	98,48	0,014	0,080	0,007	98,50
Fe-003	98,50	0,016	0,085	0,009	98,50

GB/T 5169-2013 Méthode d'essai de la porosité du carbure cimenté

1 Portée

Cette norme spécifie la méthode d'essai de la porosité du carbure cimenté. Cette méthode s'applique aux matériaux et produits en carbure cimenté (tels que les nuances YG6, YG8, etc.) dont la phase dure est le carbure de tungstène (WC) et la phase de liaison le cobalt (Co). La porosité (unité : %) est déterminée par méthode métallographique ou par analyse d'image, incluant les pores de type A (petits pores), de type B (gros pores) et de type C (agrégats). Cette méthode peut être utilisée pour le contrôle qualité en production, l'acceptation des produits et l'évaluation des performances en recherche et développement.

Cette norme ne s'applique pas aux carbures cimentés contenant des inclusions non métalliques significatives ou aux carbures sans cobalt.

2 Références normatives

Les documents suivants sont essentiels à l'application de la présente norme. Pour tout document référencé daté, seule la version datée s'applique. Pour tout document référencé non daté, la dernière version (y compris tous les amendements) s'applique.

GB/T 18376-2014 Méthode d'essai de la microstructure du carbure cimenté

GB/T 3850-2015 Méthode de détermination de la masse volumique du carbure cimenté

GB/T 13298-2015 Méthodes d'inspection de la microstructure métallique

GB/T 4338 Méthode de corrosion des microstructures métalliques

ASTM B276 Détermination de la porosité apparente du carbure cimenté

Méthode d'évaluation de la microstructure du carbure cimenté ISO 4505

3 Termes et définitions

Les termes et définitions suivants s'appliquent à cette norme.

3.1 Porosité

La fraction volumique des pores dans le carbure cimenté reflète la densité du matériau. L'unité est le %, qui peut être divisé en type A (diamètre < 10 μm), type B (diamètre 10-25 μm) et type C (diamètre > 25 μm).

3.2 Le métal dur est un matériau composite composé de carbure de tungstène (WC)

comme phase dure et de cobalt (Co) comme phase de liaison grâce au procédé de métallurgie des poudres.

3.3 Méthode métallographique :

Méthode permettant de déterminer quantitativement la porosité par la préparation d'échantillons, la corrosion et l'observation microscopique.

3.4 Méthode d'analyse d'image :

Cette méthode utilise la technologie de traitement d'image pour extraire les données de pores à partir

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

d'images de microscope ou de microscope électronique à balayage (MEB).

4 Principe

Le test de porosité du carbure cémenté repose sur l'observation de la microstructure transversale de l'échantillon au microscope optique ou au MEB après préparation, ainsi que sur l'identification et la classification des pores (types A, B et C). La méthode métallographique calcule la porosité en comptant manuellement ou automatiquement le nombre et la surface des pores ; la méthode d'analyse d'images utilise un logiciel pour traiter les données d'image et mesurer automatiquement la distribution et le pourcentage des pores. La porosité est étroitement liée au processus de frittage, au bilan carbone et à l'uniformité microstructurale, et influence les propriétés des matériaux.

5. Instruments et équipements

5.1 Microscope optique

Grossissement 100x-1000x, équipé d'un système d'analyse d'image, précision $\pm 0,1 \mu\text{m}$.

5.2 Microscopie électronique à balayage (MEB)

La résolution est $\leq 0,1 \mu\text{m}$ et il est équipé d'un spectromètre dispersif en énergie (EDS) pour l'analyse des caractéristiques des pores.

5.3 Machine de découpe

Équipé d'une meule diamantée et d'une lubrification par liquide de refroidissement pour éviter les dommages thermiques.

5.4 Machine à poncer et à polir

Équipé de papier de verre SiC (#200-#1200) et de suspension diamantée (granulométrie 1-3 μm), rugosité de surface $R_a \leq 0,05 \mu\text{m}$.

5.5 Nettoyeur à ultrasons

Utilisé pour le nettoyage des échantillons et l'élimination des matériaux de broyage résiduels.

5.6 Boîte à température constante

Contrôlez la température de séchage à 105°C avec une précision de $\pm 2^\circ\text{C}$.

6 réactifs

6.1 Eau déionisée

Conforme à la norme ISO 3696 Classe I sur l'eau.

6.2 Réactif de Murakami

Formule : $10 \text{ g K}_3 [\text{Fe}(\text{CN})_6] + 10 \text{ g KOH} + 100 \text{ mL H}_2\text{O}$, temps de corrosion 5 à 30 secondes, selon la réaction de l'échantillon.

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

6.3 Éthanol

Qualité analytique, concentration $\geq 99,5$ %, utilisé pour le nettoyage.

7 spécimens

7.1 Exigences relatives à l'échantillon

Forme : rectangulaire ou cylindrique, taille ≥ 10 mm \times 10 mm \times 5 mm, masse ≥ 5 g.

Etat de surface : pas de fissures (< 5 μ m) ni de couche d'oxyde, porosité $< 0,5\%$.

Homogénéité : écart de composition $< 0,1$ % en poids, fluctuation de la granulométrie < 5 %.

Quantité : Pas moins de 3 échantillons par lot, hautement représentatifs.

7.2 Préparation des échantillons

Découpe : La découpe est réalisée avec une meule diamantée perpendiculaire à la direction de frittage, lubrifiée avec du liquide de refroidissement, à une vitesse < 500 tr/min.

Meulage : utilisez du papier de verre SiC n° 200, n° 400, n° 800 et n° 1200 en séquence, appliquez une pression de 20 à 30 N et le temps est de 2 à 3 minutes/niveau.

Polissage : Utiliser une suspension de diamant de 1 à 3 μ m et un chiffon en flanelle pendant 5 à 10 minutes, surface $R_a \leq 0,05$ μ m.

Nettoyage et séchage : Nettoyage par ultrasons à l'éthanol pendant 5 min, séchage à 105°C pendant 30 min, puis refroidissement à température ambiante.

8 Affichage de la microstructure

8.1 Corrosion

Utilisez le réactif de Murakami pour corroder la surface de l'échantillon pendant 5 à 30 secondes (WC est marron, Co est blanc et les pores sont noirs), observez la réaction et ajustez le temps si nécessaire.

Après corrosion, rincer à l'eau déionisée, déshydrater à l'éthanol et sécher immédiatement.

8.2 Inspection

Assure une corrosion uniforme sans sur-corrosion (joints de grains flous) ou sous-corrosion (porosité non révélée).

9 Test de porosité

9.1 Métallographie

Observation : Utilisez un microscope optique avec un grossissement de 500x à 1000x et observez 10 champs de vision aléatoires.

Mesure : Comptez manuellement le nombre de pores de type A, B et C et mesurez la surface des pores (précision $\pm 0,1$ μ m²).

Calcul : Porosité = surface totale des pores/surface totale du champ $\times 100$ %, conserver 2 décimales.

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

9.2 Analyse d'image

Observation : Utiliser un microscope électronique à balayage (MEB) ou un microscope optique à haute résolution, grossissement 1000x-5000x, prendre 10 images.

Analyse : utilisez un logiciel de traitement d'image (tel qu'ImageJ) pour identifier automatiquement les pores, les classer en types A, B et C et calculer le pourcentage de surface.

Vérification : Répéter la mesure 3 fois et prendre la valeur moyenne. L'écart est $< 0,02 \%$.

9.3 Classification des pores

Type A : diamètre $< 10 \mu\text{m}$, petits pores.

Type B : 10-25 μm de diamètre, gros pores.

Type C : diamètre $> 25 \mu\text{m}$, agrégats.

10. Expression du résultat

La porosité est exprimée en %, avec 2 décimales (ex : 0,05%).

Le rapport d'essai doit inclure :

a) Numéro de norme : GB/T 5169-2013 ; b) Description de l'échantillon : marque, lot, taille ; c) Conditions de préparation : découpe, meulage, polissage ; d) Méthode d'essai : méthode métallographique ou méthode d'analyse d'image ; e) Résultat : porosité totale et distribution des types A, B, C ; f) Date d'essai : par exemple le 21 mai 2025 ; g) Testeur : signature.

11 Précision et biais

11.1 Précision

Répétabilité : L'écart de porosité mesuré par le même opérateur et le même équipement est $< 0,02 \%$.

Reproductibilité : L'écart de porosité entre les différents laboratoires est $< 0,05 \%$.

11.2 Biais

Erreur de l'instrument : Erreur de mesure du microscope $\pm 0,1 \mu\text{m}$, impact $< 0,01 \%$.

Erreur de préparation : les rayures de meulage ou la surgravure peuvent surestimer la porosité de 0,02 à 0,05 %.

Inhomogénéité de l'échantillon : un écart de composition $> 0,1 \%$ en poids entraîne une fluctuation de la porosité de 0,1 %.

12 facteurs d'influence

12.1 Processus de frittage

La température (1350-1500°C) affecte la porosité, et $> 1450^\circ\text{C}$ augmente les pores de type B et C ($> 0,1\%$).

Le pressage isostatique à chaud (HIP, 150 MPa) a réduit la porosité totale ($< 0,01 \%$).

12.2 Bilan carbone

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

Le carbone insuffisant forme la phase η , augmentant la porosité de 0,05 à 0,1 % ; l'excès de carbone précipite le carbone libre, avec un impact de $< 0,02$ %.

12.3 Taille des grains

Les grains fins (0,2-0,5 μm) ont une faible porosité ($< 0,03\%$), tandis que les grains grossiers (> 5 μm) ont une porosité élevée ($> 0,15\%$).

12.4 Défauts

Les inclusions (par exemple Fe 0,1 %) entraînent une augmentation locale de la porosité de 0,05 à 0,1 %.

13 Application des résultats des tests

13.1 Contrôle de la qualité

Porosité $< 0,05\%$ conforme à la norme YG6 et assure une dureté HRA > 90 .

13.2 Optimisation des processus

Une porosité $> 0,1\%$ indique un frittage insuffisant, ajustez la température (1400°C) ou la pression.

13.3 Prédiction des performances

Une porosité $< 0,03$ % correspond à une résistance à la flexion élevée ($> 2\ 000$ MPa), $> 0,1$ % réduit la ténacité.

13.4 Exemples

Outil YG8, porosité 0,04%, durée de vie de coupe > 3 heures.

14 Notes

14.1 Étalonnage de l'instrument

Le microscope a été calibré avant le test, avec une erreur de $\leq \pm 0,1$ μm .

14.2 Qualité de l'échantillon

Assurez-vous qu'il n'y a pas de rayures sur la surface de l'échantillon et que la corrosion est uniforme.

14.3 Contrôle environnemental

La température de la salle d'essai était de 20 à 25 °C et l'humidité était < 60 %.

14.4 Protection de sécurité

Portez des lunettes de protection pendant le fonctionnement pour éviter les éclaboussures de liquide corrosif.

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

15 Annexe (Annexe informative)

Annexe A Plage de porosité typique

Tableau A.1 Porosité des nuances courantes de carbure cimenté

Marque	Teneur en cobalt (% en poids)	Taille des grains (μm)	Porosité(%)
YG6	6	0,6-0,8	0,02-0,05
YG8	8	0,8-1,0	0,03-0,06
YG10	10	1,0-1,2	0,04-0,07

Annexe B Analyse des erreurs

B.1 Erreur de l'instrument

L'erreur de mesure du microscope est de $\pm 0,1 \mu\text{m}$, affectant la porosité de $< 0,01 \%$.

B.2 Défauts de préparation

La surcorrosion entraîne une surestimation de la porosité de 0,02 à 0,05 %.

B.3 Impact environnemental

Une humidité $> 70 \%$ provoque une oxydation de surface, affectant la mesure de 0,01 %.

Annexe C Suggestions d'amélioration

C.1 Utiliser la tomographie à rayons X (CT) pour détecter la porosité interne avec une précision de $< 0,01 \%$.

C.2 Utiliser un système d'analyse d'image automatique pour améliorer la cohérence des mesures de porosité. C.3 Introduire un procédé de frittage sous vide pour réduire la porosité initiale.

Annexe D Exemples de données de test

Tableau D.1 Données d'essai de porosité du carbure cimenté YG8

Numéro d'échantillon	Type A (%)	Type B (%)	Type C (%)	Porosité totale (%)	valeur moyenne (%)
YG8-001	0,02	0,01	0,00	0,03	0,04
YG8-002	0,03	0,01	0,01	0,05	0,04
YG8-003	0,02	0,02	0,00	0,04	0,04

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

GB/T 12444-2006 Méthodes d'essai pour la résistance à l'usure des métaux et alliages

1 Portée

Cette norme spécifie la méthode d'essai de résistance à l'usure des métaux et alliages. Cette méthode s'applique aux métaux et alliages (tels que l'acier, les alliages d'aluminium, les alliages de cuivre, etc.) et à leurs revêtements de surface. Des essais d'usure en laboratoire permettent d'évaluer la résistance à l'usure des matériaux, notamment l'usure par faible contrainte (rayure), l'usure par forte contrainte (impact) et l'usure par glissement. Cette méthode peut être utilisée pour la sélection des matériaux, le contrôle qualité, la réception en production et l'évaluation de la résistance à l'usure en recherche et développement.

Cette norme ne s'applique pas aux matériaux non métalliques ni à l'usure dans des environnements extrêmes (tels que des températures élevées > 1000°C ou des environnements hautement corrosifs).

2 Références normatives

Les documents suivants sont essentiels à l'application de la présente norme. Pour tout document référencé daté, seule la version datée s'applique. Pour tout document référencé non daté, la dernière version (y compris tous les amendements) s'applique.

GB/T 6394 Dimensions et méthodes de préparation des éprouvettes métalliques

GB/T 10610 Détermination de la rugosité de surface des matériaux métalliques

GB/T 13298-2015 Méthodes d'inspection de la microstructure métallique

Méthode d'essai standard ASTM G65 pour l'abrasion des roues en caoutchouc et sable sec

ASTM D4060 Méthode d'essai standard pour la résistance à l'abrasion des revêtements organiques à l'aide de l'abrasif Taber

ISO 8251 Détermination de la résistance à l'usure des revêtements d'oxyde anodiques sur l'aluminium et ses alliages

3 Termes et définitions

Les termes et définitions suivants s'appliquent à cette norme.

3.1 Résistance à l'usure

Capacité d'un métal ou d'un alliage à résister à la perte de matière de surface dans des conditions d'usure spécifiques, généralement caractérisées par une perte de masse, une perte de volume ou une profondeur d'usure.

3.2 Abrasion à faible contrainte :

usure causée par de légères rayures ou glissements, courante dans les environnements d'usure à faible charge et à faible impact.

3.3 Abrasion à haute contrainte :

usure causée par une charge élevée ou un impact, souvent accompagnée d'une déformation plastique

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

ou d'une fracture de la surface du matériau.

3.4 Usure par glissement

Perte de matière causée par le frottement lorsque deux surfaces glissent l'une par rapport à l'autre.

3.5 Taux d'usure

Quantité de perte de matière par unité de temps ou par unité de distance de glissement, exprimée en g/m ou mm³ / N · m.

4 Principe

La résistance à l'usure des métaux et alliages est évaluée par des essais d'usure réalisés en laboratoire dans des conditions contrôlées. Les méthodes d'essai comprennent l'essai sur sable sec/roue en caoutchouc (usure à faible contrainte), l'essai d'abrasion Taber (usure par glissement) et l'essai d'usure par impact, qui simulent différents mécanismes d'usure. La résistance à l'usure est caractérisée par la mesure de la perte de masse, de la perte de volume ou de la profondeur d'usure de l'éprouvette avant et après l'essai. Les conditions d'essai (telles que la charge, la vitesse, le type d'abrasif) ont un impact direct sur les résultats et doivent être strictement contrôlées.

5. Instruments et équipements

5.1 Balance analytique

Précision : ± 0,0001 g, utilisé pour peser la masse de l'échantillon.

5.2 Machine d'essai de roues en sable sec/caoutchouc

Conforme aux exigences ASTM G65, dureté de la roue en caoutchouc 60-70 Shore A, débit de sable 300-400 g/min.

5.3 Testeur d'abrasion Taber

Conforme aux exigences ASTM D4060 avec des meules CS-17 ou H-18, charge de 500 à 1 000 g.

5.4 Machine d'essai d'usure par impact

Simule une usure à haute contrainte, fréquence d'impact 50 à 100 fois/min, charge 10 à 50 N.

5.5 Microscope

Grossissement 50x-500x, utilisé pour observer la morphologie de l'usure.

5.6 Testeur de rugosité de surface

Conforme à la norme GB/T 10610, plage de mesure Ra 0,01-10 µm.

6 Réactifs et matériaux

6.1 Abrasifs standards

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

Sable sec : sable de quartz naturel, granulométrie 50-70 mesh, conforme à la norme ASTM G65.

Roues Taber : CS-17 (dureté moyenne) ou H-18 (dureté élevée).

6.2 Éthanol

Qualité analytique, concentration $\geq 99,5\%$, utilisé pour le nettoyage.

6.3 Eau déionisée

Conforme à la norme ISO 3696 Grade 1 sur l'eau.

7 spécimens

7.1 Exigences relatives à l'échantillon

Forme : Rectangulaire ou circulaire, dimensions 76 mm \times 25 mm \times 6 mm (test sable sec/roue en caoutchouc) ou 100 mm de diamètre \times 3 mm d'épaisseur (test Taber).

État de surface : surface lisse, sans fissures, rugosité $R_a \leq 0,8 \mu\text{m}$.

Quantité : Au moins 3 spécimens pour chaque condition.

Homogénéité : Écart de composition $< 0,1\%$ en poids.

7.2 Préparation des échantillons

Les échantillons ont été coupés conformément à la norme GB/T 6394 et les surfaces ont été meulées avec du papier de verre SiC #600-#1200.

Les échantillons ont été nettoyés par ultrasons avec de l'éthanol pendant 5 minutes et pesés ($\pm 0,0001$ g) après séchage.

8 Méthodes d'essai

8.1 Essai de roue en sable sec/caoutchouc (faible usure sous contrainte)

8.1.1 Conditions d'essai

Charge : 130 N.

Débit de sable : 300-400 g/min.

Durée du test : 6000 tr/min (environ 30 minutes).

Environnement : Température $23 \pm 2^\circ\text{C}$, humidité $50 \pm 5\%$.

8.1.2 Étapes de test

Fixez l'échantillon sur le support de la machine d'essai et ajustez la roue en caoutchouc pour qu'elle entre en contact avec l'échantillon.

Démarrez le flux de sable, faites tourner la roue en caoutchouc et enregistrez la masse au début du test (W_1).

Après le test, retirez l'échantillon, nettoyez-le, séchez-le et pesez-le (W_2).

Calculer la perte de masse : $\Delta W = W_1 - W_2$

La mesure a été répétée 3 fois et la valeur moyenne a été prise avec un écart de $< 5\%$.

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

8.2 Essai d'usure Taber (usure par glissement)

8.2.1 Conditions d'essai

Meule : CS-17 (usure moyenne).

Charge : 1000 g.

Vitesse de rotation : 60 tr/min.

Cycle d'essai : 10 000 tours.

Environnement : Température 23±2°C, humidité 50±5%.

8.2.2 Étapes de test

Fixez l'échantillon sur le plateau tournant de la machine d'essai Taber et installez la meule.

Enregistrez la masse au début du test (W_1).

Démarrez la machine d'essai, faites-la tourner à 10 000 tours et nettoyez régulièrement les débris de meulage.

Après le test, nettoyez l'échantillon et pesez-le (W_2).

Calculer la perte de masse :
$$\text{磨损指数} = \frac{\Delta W}{\text{测试质量}} \times 1000$$

La mesure a été répétée 3 fois et la valeur moyenne a été prise avec un écart de <5%.

8.3 Essai d'usure par impact (usure sous forte contrainte)

8.3.1 Conditions d'essai

Charge : 20 N.

Fréquence d'impact : 60 fois/min.

Durée du test : 30 minutes.

Environnement : Température 23±2°C, humidité 50±5%.

8.3.2 Étapes de test

Fixez l'échantillon sur le support du testeur d'impact et ajustez la position de la tête d'impact.

Enregistrez la masse au début du test (W_1).

Démarrez la machine de test, faites-la fonctionner pendant 30 minutes et enregistrez le nombre d'impacts.

Après le test, nettoyez l'échantillon et pesez-le (W_2).

Calculer la perte de masse :
$$\Delta W = W_1 - W_2$$

La mesure a été répétée 3 fois et la valeur moyenne a été prise avec un écart de <5%.

9 Expression des résultats

La perte de masse est exprimée en grammes avec quatre décimales (par exemple 0,0123 g).

L'indice d'usure est exprimé en mg/1000 tours, avec une décimale (par exemple 1,2 mg/1000 tours).

Le rapport d'essai doit inclure :

a) Numéro de norme : GB/T 12444-2006 ; b) Description de l'échantillon : marque du matériau,

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

taille, état de surface ; c) Méthode d'essai : sable sec/roue en caoutchouc, abrasion Taber ou usure par impact ; d) Conditions d'essai : charge, vitesse, type d'abrasif ; e) Résultat : perte de masse ou indice d'usure ; f) Date d'essai : par exemple le 21 mai 2025 ; g) Testeur : signature.

10 Précision et biais

10.1 Précision

Répétabilité : L'écart de perte de masse mesuré par le même opérateur et le même équipement est < 5 %.

Reproductibilité : L'écart de perte de masse mesuré par différents laboratoires est <10%.

10.2 Biais

Erreur de l'instrument : erreur d'équilibre $\pm 0,0001$ g, influence <1%.

Déviabilité abrasive : la non-uniformité du grain entraîne une perte de masse fluctuante de 2 à 5 %.

Influence environnementale : L'humidité > 60 % provoque une oxydation de surface, affectant < 2 %.

11 facteurs d'influence

11.1 Dureté du matériau

Une dureté élevée (telle que HRC > 60) offre une bonne résistance à l'usure et réduit la perte de masse de 10 à 20 %.

11.2 Rugosité de surface

$R_a > 1,0$ μm augmente l'usure et la perte de masse de 5 à 10 %.

11.3 Propriétés abrasives

L'augmentation de la taille des particules de sable (> 70 mesh) augmente l'usure et augmente la perte de masse de 10 à 15 %.

11.4 Conditions d'essai

L'augmentation de la charge (130 N à 150 N) a augmenté la perte de masse de 5 à 8 %.

12 Application des résultats des tests

12.1 Sélection des matériaux

Perte de masse < 0,01 g Répond aux exigences élevées de résistance à l'usure et convient aux équipements miniers.

12.2 Optimisation des processus

Une perte de masse > 0,05 g indique un traitement thermique insuffisant et la température de trempage

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

doit être ajustée (900°C).

12.3 Prédiction des performances

Un indice d'usure <1,5 mg/1000 tours correspond à une durée de vie >10 ans.

12.4 Exemples

Acier 45#, test de sable sec, perte de masse 0,008 g, utilisé pour le godet d'excavatrice, durée de vie > 5000 heures.

13 notes

13.1 Étalonnage de l'instrument

La machine d'essai a été calibrée avant le test et l'écart de charge était $\leq \pm 1\%$.

13.2 Qualité de l'échantillon

Assurez-vous que la surface de l'échantillon est propre et présente une rugosité uniforme.

13.3 Contrôle environnemental

La température de la salle d'essai était de $23 \pm 2^\circ\text{C}$ et l'humidité était de $50 \pm 5\%$.

13.4 Protection de sécurité

Portez des lunettes de protection pendant le fonctionnement pour éviter les éclaboussures de sable.

14 Annexe (Annexe informative)

Annexe A Données typiques de résistance à l'usure

Tableau A.1 Perte de masse des métaux et alliages courants

Matériel	Méthodes d'essai	Perte de masse (g)	Indice d'usure (mg/1000 tours)
Acier 45#	Roue en sable sec/caoutchouc	0,008	-
Acier inoxydable 304	Taber Wear	0,012	1.2
Alliage d'aluminium 6061	Usure par impact	0,015	-

Annexe B Analyse des erreurs

B.1 Erreur de l'instrument

L'erreur d'équilibre est de $\pm 0,0001$ g et l'influence est $< 1\%$.

B.2 Déviation abrasive

L'inhomogénéité des particules de sable entraîne une fluctuation de la perte de masse de 2 à 5 %.

B.3 Impact environnemental

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

L'humidité > 60 % provoque une oxydation de surface, affectant < 2 %.

Annexe C Suggestions d'amélioration

- C.1 Utiliser un microscope laser pour mesurer avec précision la profondeur d'usure (< 0,01 μm).
C.2 Utiliser des abrasifs standardisés pour réduire les écarts. C.3 Introduire un système de surveillance en temps réel pour améliorer la cohérence des tests.

Annexe D Exemples de données de test

Tableau D.1 Données d'essai sur roue en acier 45# sable sec/caoutchouc

Numéro d'échantillon	Masse avant test (g)	Masse après test (g)	Perte de masse (g)	Valeur moyenne (g)
45#-001	50.1234	50.1156	0,0078	0,0080
45#-002	50.1250	50.1169	0,0081	0,0080
45#-003	50.1242	50.1160	0,0082	0,0080

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

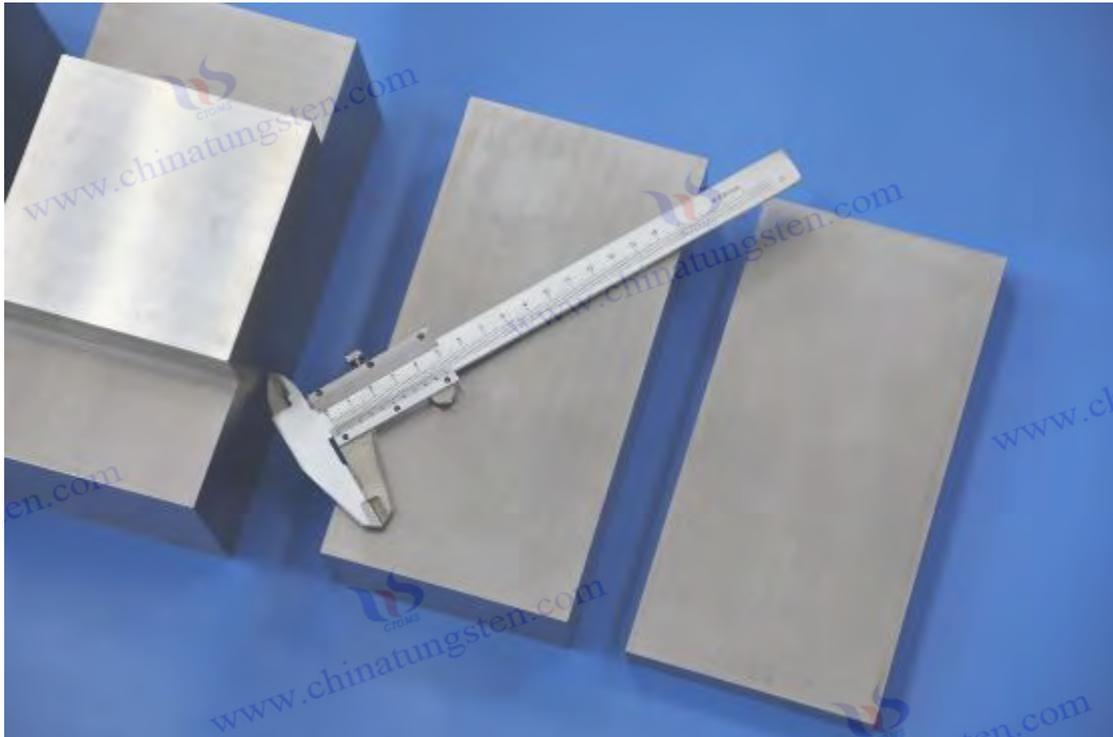
WeChat : Follow "China Tungsten Online"



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



GB/T 1482-2010 Détermination de la fluidité des poudres métalliques Méthode du débitmètre à effet Hall

1 Portée

Cette norme spécifie la méthode de détermination de la fluidité des poudres métalliques par débitmètre à effet Hall. Cette méthode s'applique aux poudres métalliques s'écoulant librement dans un entonnoir standard dont le diamètre d'orifice est de 2,5 mm. Le temps (unité : seconde) nécessaire à l'écoulement de 50 g de poudre à travers l'entonnoir standard est mesuré afin de caractériser la fluidité de la poudre. Cette méthode peut être utilisée pour le contrôle qualité, la réception en production et l'évaluation de la fluidité en R&D en métallurgie des poudres, en fabrication additive (impression 3D SLM, procédé EBM) et dans les domaines connexes.

Cette norme ne s'applique pas aux poudres qui ne sont pas fluides (telles que les poudres ultrafines avec une granulométrie $< 10 \mu\text{m}$ ou les poudres hautement adhésives).

2 Références normatives

Les documents suivants sont essentiels à l'application de la présente norme. Pour tout document référencé daté, seule la version datée s'applique. Pour tout document référencé non daté, la dernière version (y compris tous les amendements) s'applique.

GB/T 5314-2011 Méthode d'échantillonnage de poudre pour la métallurgie des poudres

GB/T 1479.1-2010 Détermination de la masse volumique apparente des poudres métalliques Partie 1 : Méthode de l'entonnoir

GB/T 31057.3-2008 Propriétés physiques des matériaux granulaires Partie 3 : Indice de fluidité

ISO 4490:2008 Détermination des propriétés d'écoulement des poudres métalliques à l'aide d'un

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

entonnoir calibré (rhéomètre à effet Hall)

ASTM B213-17 Méthode standard pour déterminer le débit des poudres métalliques à l'aide d'un entonnoir à débitmètre à effet Hall

3 Termes et définitions

Les termes et définitions suivants s'appliquent à cette norme.

3.1 Fluidité

Capacité d'une poudre métallique à s'écouler librement dans des conditions spécifiées, caractérisée par le temps (secondes) nécessaire pour que 50 g de poudre s'écoulent à travers un entonnoir standard (taille des pores 2,5 mm), avec l'unité s/50 g.

3.2 Débitmètre à effet Hall :

Instrument utilisé pour mesurer la fluidité des poudres métalliques. Il se compose d'un entonnoir standard, d'un récipient de réception et d'un chronomètre.

3.3 Poudre métallique

Particules de métal ou d'alliage préparées par atomisation, réduction ou méthodes chimiques, utilisées dans la métallurgie des poudres ou la fabrication additive.

3.4 Écoulement libre :

La poudre peut s'écouler en continu à travers un entonnoir standard sans aucune force externe (gravité seule).

4 Principe

La méthode du débitmètre à effet Hall caractérise la coulabilité d'une poudre métallique en mesurant le temps nécessaire à 50 g de poudre pour s'écouler à travers un entonnoir standard de 2,5 mm de diamètre. La coulabilité est influencée par les propriétés physiques de la poudre, telles que la granulométrie, la forme, l'état de surface, l'adhérence et le frottement. Plus le temps d'écoulement est court, meilleure est la coulabilité. L'essai doit être réalisé dans des conditions environnementales contrôlées afin de garantir la répétabilité et la précision des résultats.

5. Instruments et équipements

5.1 Débitmètre à effet Hall

Entonnoir : Fabriqué en métal non magnétique et résistant à la corrosion (tel que l'acier inoxydable), avec paroi intérieure polie et rugosité $Ra \leq 0,4 \mu\text{m}$.

Paramètres géométriques de l'entonnoir : diamètre supérieur 60 mm, ouverture inférieure $2,5 \pm 0,02$ mm, angle du cône $60^\circ \pm 0,5^\circ$.

Hauteur : 100 ± 2 mm du trou inférieur au trou supérieur.

5.2 Conteneur de réception

Volume ≥ 100 mL, diamètre ≥ 39 mm, utilisé pour recevoir la poudre sortante.

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

5.3 Balance analytique

Plage de mesure ≥ 100 g, précision $\pm 0,01$ g.

5.4 Chronomètre

Précision $\pm 0,2$ s, utilisée pour le chronométrage.

5.5 Nettoyeur à ultrasons

Pour nettoyer les entonnoirs et les conteneurs.

5.6 Étuve de séchage

Plage de contrôle de température $105 \pm 2^\circ\text{C}$ pour le séchage de la poudre.

6 réactifs

6.1 Éthanol

Qualité analytique, concentration $\geq 99,5\%$, utilisé pour le nettoyage.

6.2 Eau déionisée

Conforme à la norme ISO 3696 Grade 1 sur l'eau.

7 spécimens

7.1 Exigences relatives à l'échantillon

Volume d'échantillon : au moins 200 g, capable de s'écouler librement à travers un entonnoir à pores de 2,5 mm.

Taille des particules : généralement 10 à 150 μm , selon le type de poudre.

Uniformité : Écart de distribution granulométrique $< 5\%$, éviter l'agglomération ou la stratification.

Quantité : Chaque lot doit être divisé en 3 portions après échantillonnage, chaque portion doit être ≥ 50 g.

7.2 Préparation des échantillons

Des échantillons ont été prélevés sur le lot de poudre conformément à la norme GB/T 5314-2011 pour garantir la représentativité.

Placer l'échantillon dans une étuve ($105 \pm 2^\circ\text{C}$) et sécher pendant 30 minutes, puis refroidir à température ambiante.

S'il y a de l'huile sur la surface de la poudre, utilisez un nettoyage par ultrasons à l'éthanol pendant 5 minutes et utilisez-le après séchage.

8 Méthodes d'essai

8.1 Conditions d'essai

Température ambiante : $23 \pm 2^\circ\text{C}$.

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

Humidité relative : 50 ± 5 %, éviter que la poudre absorbe l'humidité.

Zone de test : Aucune interférence avec le flux d'air, l'instrument est placé sur une surface horizontale.

8.2 Étalonnage de l'instrument

Vérifiez l'ouverture de l'entonnoir ($2,5 \pm 0,02$ mm) pour vous assurer qu'il n'y a pas de blocage ou de déformation.

L'instrument a été étalonné avec de la poudre standard (poudre sphérique pure avec un débit connu, tel qu'un temps d'écoulement de 30 ± 1 s/50 g) avec un écart de $< \pm 2$ %.

8.3 Procédures d'essai

Pesez $50 \pm 0,01$ g d'échantillon et enregistrez la masse (m).

Fermez temporairement le trou au fond de l'entonnoir avec votre doigt ou un déflecteur et versez l'échantillon dans l'entonnoir pour vous assurer que la poudre est uniformément répartie.

Démarrez le chronomètre et retirez simultanément le déflecteur pour permettre à la poudre de s'écouler librement.

Lorsque la poudre s'est complètement écoulee (aucun résidu dans l'entonnoir), arrêtez le chronométrage et enregistrez le temps d'écoulement (t, unité : secondes).

Chaque échantillon a été mesuré 3 fois et la valeur moyenne a été prise avec un écart de $< \pm 2$ s.

Si la poudre ne peut pas s'écouler ou est bloquée à mi-chemin, enregistrez-la comme « ne peut pas s'écouler ».

8.4 Traitement des données

La fluidité est exprimée en temps d'écoulement (s/50 g) avec une décimale (par exemple 32,5 s/50 g).

Si l'écart entre les trois mesures était > 2 s, les valeurs aberrantes étaient éliminées et le test était répété.

9 Expression des résultats

La fluidité est exprimée en temps d'écoulement (s/50 g) avec une décimale.

Le rapport d'essai doit inclure :

a) Numéro de norme : GB/T 1482-2010 ; b) Description de l'échantillon : type de poudre, lot, distribution granulométrique ; c) Conditions d'essai : température, humidité ; d) État de l'instrument : ouverture de l'entonnoir, étalonnage ; e) Résultats : temps d'écoulement moyen et écart ; f) Date d'essai : par exemple le 21 mai 2025 ; g) Testeur : signature.

10 Précision et biais

10.1 Précision

Répétabilité : L'écart de temps d'écoulement mesuré par le même opérateur et le même équipement est $< \pm 2$ s.

Reproductibilité : L'écart du temps d'écoulement mesuré par différents laboratoires est $< \pm 3$ s.

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

10.2 Biais

Erreur de l'instrument : écart d'ouverture de l'entonnoir $\pm 0,02$ mm, temps d'impact $\leq \pm 1$ s.

État de la poudre : l'absorption ou l'agglomération d'humidité prolongera le temps d'écoulement de 2 à 5 s.

Erreur opérationnelle : un versement irrégulier ou un écart de synchronisation affecte $\leq \pm 1$ s.

11 facteurs d'influence

11.1 Distribution granulométrique

La taille des particules $< 45 \mu\text{m}$ augmente l'adhérence et prolonge le temps d'écoulement de 5 à 10 s ; la taille des particules $> 150 \mu\text{m}$ a une bonne fluidité et raccourcit le temps de 3 à 5 s.

11.2 Forme des particules

Les poudres sphériques (telles que celles produites par dépôt AEM, avec un temps d'écoulement < 35 s/50 g) s'écoulent mieux que les formes irrégulières (5 à 10 s de plus).

11.3 Conditions de surface

Une surface rugueuse ou des billes satellites (petites particules attachées) prolongeront le temps d'écoulement de 3 à 8 secondes.

11.4 Conditions environnementales

Une humidité $> 60\%$ provoque l'absorption d'humidité par la poudre et le temps d'écoulement est prolongé de 2 à 5 s.

11.5 Propriétés de la poudre

Une forte adhérence ou friction (comme des poudres fines ou des surfaces oxydées) entraîne un mauvais écoulement et peut ne pas s'écouler.

12 Application des résultats des tests

12.1 Contrôle de la qualité

Le temps d'écoulement < 35 s/50 g répond aux exigences du processus d'impression 3D SLM.

12.2 Optimisation des processus

Un temps d'écoulement > 40 s/50 g indique que la forme des particules est mauvaise et que le processus d'atomisation doit être optimisé.

12.3 Prédiction des performances

Un temps d'écoulement < 30 s/50 g correspond à une bonne performance d'étalement uniforme de la poudre et à un taux de défauts d'impression $< 1\%$.

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

12.4 Exemples

Poudre d'alliage de titane (Ti-6Al-4V), temps d'écoulement 32,5 s/50 g, utilisée pour l'impression de pièces aéronautiques, rugosité de surface Ra <5 µm.

13 notes

13.1 Étalonnage de l'instrument

L'ouverture de l'entonnoir et le chronomètre ont été calibrés avant le test, avec un écart de <±1%.

13.2 Qualité de l'échantillon

Assurez-vous que l'échantillon est sec et exempt d'agglomérats.

13.3 Contrôle environnemental

La température de la salle d'essai était de 23±2°C et l'humidité était de 50±5%.

13.4 Protection de sécurité

Évitez les projections de poudre pendant le fonctionnement et portez un masque de protection.

14 Annexe (Annexe informative)

Annexe A Données de liquidité typiques

Tableau A.1 Temps d'écoulement des poudres métalliques courantes

Type de poudre	Taille des particules (µm)	Forme des particules	Temps d'écoulement (s/50 g)
Poudre d'alliage de titane	15-45	sphérique	30,0-35,0
Poudre d'acier inoxydable	20-63	sphérique	28,0-33,0
Poudre de cuivre	45-100	irrégulier	35,0-40,0

Annexe B Analyse des erreurs

B.1 Erreur de l'instrument

Une déviation de l'ouverture de l'entonnoir de ±0,02 mm affecte le temps d'écoulement de <±1 s.

B.2 État de la poudre

L'absorption d'humidité prolonge le temps d'écoulement de 2 à 5 s.

B.3 Impact environnemental

Une humidité > 60 % augmente le temps d'effluent de 2 à 3 s.

Annexe C Suggestions d'amélioration

C.1 Utiliser un système de chronométrage automatique pour réduire les erreurs de chronométrage manuel.

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

C.2 Utiliser un analyseur de taille de particules laser pour contrôler avec précision la distribution granulométrique. C.3 Introduire un dispositif de vibration pour améliorer la fluidité des poudres hautement adhésives.

Annexe D Exemples de données de test

Tableau D.1 Données d'essai de fluidité de la poudre d'acier inoxydable

Numéro d'échantillon	Masse (g)	Temps d'écoulement	Temps d'écoulement moyen (s/50 g)
SS-001	50.02	32,8	32,5
SS-002	50.01	32,4	32,5
SS-003	50,00	32,3	32,5



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

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

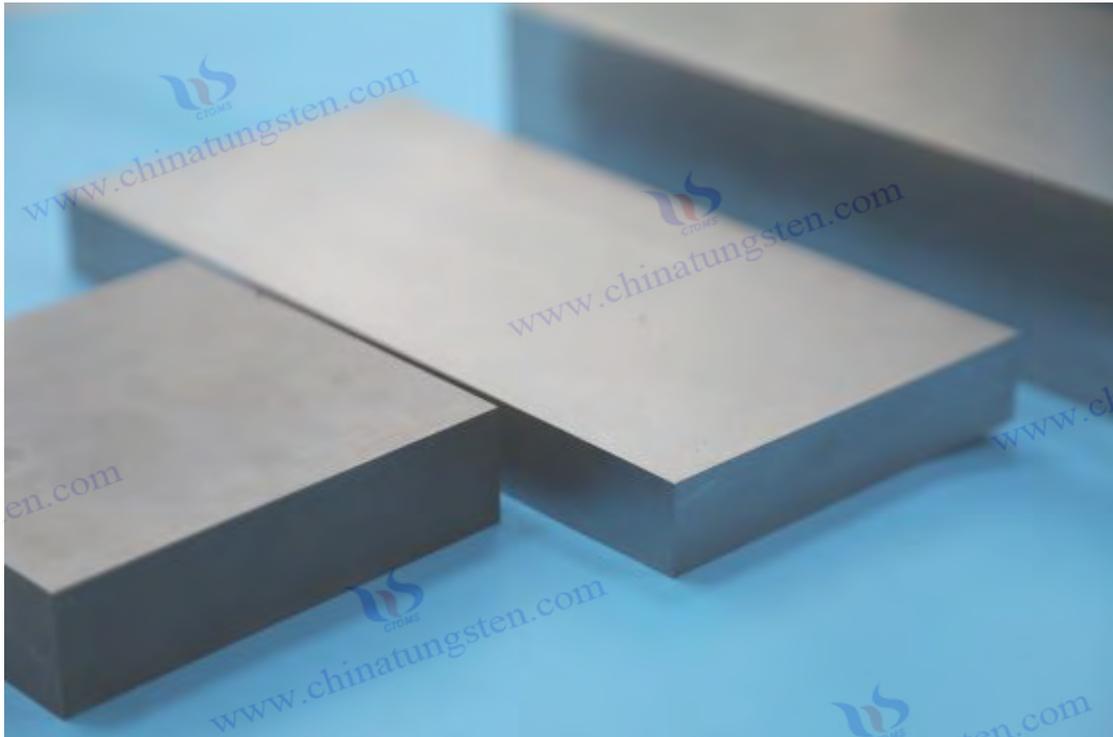
WeChat : Follow "China Tungsten Online"



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



GB/T 5243-2008 Méthode de marquage des propriétés des nuances de carbure cimenté

1 Portée

Cette norme spécifie la méthode de marquage des nuances de carbure cimenté. Cette méthode s'applique aux carbures cimentés (y compris les nuances des séries YG, YT et YW) dont la phase dure est le carbure de tungstène (WC) et la phase liante le cobalt (Co). Ses paramètres de performance, notamment sa composition chimique, ses propriétés physiques et mécaniques, sont précisés par une méthode de marquage unifiée. Cette norme peut être utilisée pour la sélection des matériaux, le contrôle qualité, l'acceptation en production et la gestion des nuances en recherche et développement.

Cette norme ne s'applique pas aux carbures cimentés sans cobalt ni aux carbures cimentés sans WC.

2 Références normatives

Les documents suivants sont essentiels à l'application de la présente norme. Pour tout document référencé daté, seule la version datée s'applique. Pour tout document référencé non daté, la dernière version (y compris tous les amendements) s'applique.

GB/T 18376-2014 Méthode d'essai de la microstructure du carbure cimenté

GB/T 3850-2015 Méthode de détermination de la masse volumique du carbure cimenté

GB/T 5169-2013 Méthode d'essai de la porosité du carbure cimenté

GB/T 5242-2006 Guide de classification et d'application des nuances de carbure cimenté

ISO 4499-1 Méthodes de détermination des propriétés physiques du carbure cimenté Partie 1 :
Masse volumique

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

ISO 4499-2 Méthodes de détermination des propriétés mécaniques du carbure cimenté Partie 2 :
Dureté

3 Termes et définitions

Les termes et définitions suivants s'appliquent à cette norme.

3.1 Le métal dur est un matériau composite composé de carbure de tungstène (WC)
comme phase dure et de cobalt (Co) comme phase de liaison par métallurgie des poudres.

3.2 Grade

Le code d'identification du carbure cimenté reflète sa composition chimique, ses propriétés physiques et ses propriétés mécaniques, et est utilisé pour distinguer les matériaux à des fins différentes.

3.3 Composition chimique

Le pourcentage massique (% en poids) de chaque élément dans le carbure cimenté, y compris le WC, le Co et les éléments ajoutés (tels que TiC, TaC).

3.4 Propriétés physiques :

Densité, porosité, granulométrie et autres propriétés du carbure cimenté.

3.5 Propriétés mécaniques :

Dureté, résistance à la flexion, ténacité et autres propriétés du carbure cimenté.

4. Méthode de marquage des performances de la marque

4.1 Règles de dénomination des marques

Les nuances de carbure cimenté sont représentées par une combinaison de lettres et de chiffres, suivant les règles suivantes :

Première lettre : Indique la catégorie d'application

YG : Carbure cimenté à usage général (alliage WC-Co).

Carbure cimenté contenant du carbure de titane (TiC) à haute résistance à l'usure.

Carbure cimenté contenant du carbure de tantale (TaC) ou du carbure de niobium (NbC) avec d'excellentes performances globales.

Nombre : Indique la teneur en cobalt (Co) (% en poids), par exemple YG6 signifie que la teneur en cobalt est de 6 %.

Suffixe (facultatif) : indique une performance ou une utilisation spéciale

K : Pour la découpe (comme YG6K).

M : Pour la résistance aux chocs (comme YG8M).

F : Grains fins (tels que YG6F).

4.2 Marquage des paramètres de performance

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

La performance de la marque doit inclure les paramètres suivants, indiqués dans un format fixe :
Composition chimique : teneur en WC, teneur en Co, teneur en éléments ajoutés (% en poids).
Propriétés physiques : masse volumique (g/cm^3), porosité (%), granulométrie (μm).
Propriétés mécaniques : dureté (HRA), résistance à la flexion (MPa), ténacité à la rupture ($\text{MPa}\cdot\text{m}^{1/2}$).

4.3 Format d'annotation

Les performances des notes sont notées sous forme de tableau, par exemple :

Marque : YG6

Composition chimique : WC 94 %, Co 6 %

Propriétés physiques : densité $14,9 \text{ g}/\text{cm}^3$, porosité $< 0,05 \%$, granulométrie $0,8-1,0 \mu\text{m}$

Propriétés mécaniques : dureté $91,5 \text{ HRA}$, résistance à la flexion 2200 MPa , ténacité à la rupture $10,5 \text{ MPa}\cdot\text{m}^{1/2}$

5 Méthodes d'essai

5.1 Détermination de la composition chimique

Après échantillonnage selon GB/T 5314-2011, les teneurs en WC, Co et éléments ajoutés ont été déterminées par analyse chimique avec une précision de $\pm 0,1 \%$ en poids.

5.2 Détermination des propriétés physiques

Densité : Selon GB/T 3850-2015, précision $\pm 0,01 \text{ g}/\text{cm}^3$.

Porosité : Selon GB/T 5169-2013, méthode métallographique ou méthode d'analyse d'image, précision $\pm 0,01 \%$.

Taille des grains : Selon GB/T 18376-2014, mesurée au microscope métallographique, précision $\pm 0,1 \mu\text{m}$.

5.3 Détermination des propriétés mécaniques

Dureté : Selon la norme ISO 4499-2, dureté Vickers (HV) ou dureté Rockwell (HRA), précision $\pm 0,5 \text{ HRA}$.

Résistance à la flexion : Selon la norme ISO 3327, méthode de flexion en trois points, précision $\pm 50 \text{ MPa}$.

Ténacité à la rupture : Selon la méthode de la poutre entaillée à bord unique (SENB), précision $\pm 0,5 \text{ MPa}\cdot\text{m}^{1/2}$.

6 Expression des résultats

Les performances des grades sont répertoriées dans un tableau, avec les valeurs des paramètres conservées aux décimales spécifiées :

Composition chimique : conserver 1 décimale (ex. $94,0\%$).

Densité : Conserver 2 décimales (par exemple $14,90 \text{ g}/\text{cm}^3$).

Porosité : conserver 2 décimales (ex : $0,05\%$).

Taille des grains : conserver 1 décimale (par exemple $1,0 \mu\text{m}$).

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

Dureté : Conserver 1 décimale (par exemple 91,5 HRA).

Résistance à la flexion : conserver les valeurs entières (par exemple 2200 MPa).

Ténacité à la rupture : conserver une décimale (par exemple $10,5 \text{ MPa} \cdot \text{m}^{1/2}$).

Le rapport d'essai doit inclure :

- a) Numéro de norme : GB/T 5243-2008 ; b) Marque : telle que YG6 ; c) Description de l'échantillon : lot, taille ; d) Méthode d'essai : composition chimique, propriétés physiques, propriétés mécaniques ; e) Résultats : tableau des paramètres de performance ; f) Date d'essai : telle que le 21 mai 2025 ; g) Testeur : signature.

7 Précision et biais

7.1 Précision

Composition chimique : Écart de répétabilité $\leq \pm 0,1 \%$ en poids.

Propriétés physiques : Écart de densité $\leq \pm 0,01 \text{ g/cm}^3$, écart de porosité $\leq \pm 0,02 \%$.

Propriétés mécaniques : écart de dureté $\leq \pm 0,5 \text{ HRA}$, écart de résistance à la flexion $\leq \pm 50 \text{ MPa}$.

7.2 Biais

Erreur de l'instrument : erreur de balance $\pm 0,0001 \text{ g}$, erreur du microscope $\pm 0,1 \mu\text{m}$.

Inhomogénéité de l'échantillon : un écart de composition $> 0,1 \%$ en poids affecte la fluctuation de la résistance à la flexion de $\pm 100 \text{ MPa}$.

Influence environnementale : une humidité $> 70 \%$ surestime la porosité de 0,01 à 0,03 %.

8 facteurs d'influence

8.1 Fluctuation de la composition

une teneur en cobalt de $\pm 0,5 \%$ entraînera une modification de la dureté de $\pm 1 \text{ HRA}$ et une modification de la résistance à la flexion de $\pm 200 \text{ MPa}$.

8.2 Granulométrie

Une granulométrie $< 0,5 \mu\text{m}$ augmente la dureté ($> 92 \text{ HRA}$) et diminue la ténacité ($< 9 \text{ MPa} \cdot \text{m}^{1/2}$); une granulométrie $> 2 \mu\text{m}$ diminue la dureté ($< 90 \text{ HRA}$) et augmente la ténacité ($> 12 \text{ MPa} \cdot \text{m}^{1/2}$).

8.3 Procédé de frittage

Une température $> 1450 \text{ }^\circ\text{C}$ augmente la porosité ($> 0,1 \%$) et réduit la résistance à la flexion de 100 à 300 MPa.

8.4 Ajout d'éléments

TiC $> 5 \%$ augmente la dureté (+1 HRA) et diminue la ténacité ($-1 \text{ MPa} \cdot \text{m}^{1/2}$).

9 Application des notes de performance

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

9.1 Sélection des matériaux

Le YG6 (dureté 91,5 HRA, résistance à la flexion 2200 MPa) convient aux outils de coupe.

9.2 Optimisation des processus

Une résistance à la flexion < 2000 MPa indique que la température de frittage est insuffisante et doit être ajustée à 1400-1450°C.

9.3 Prédiction des performances

Dureté > 91 HRA, ténacité > 10 MPa·m^{1/2} correspond à une durée de vie de coupe > 5 heures.

9.4 Exemples

YG8 (résistance à la flexion 2400 MPa, ténacité 11,0 MPa·m^{1/2}), utilisé pour les forets à percussion, durée de vie > 3000 impacts.

10. Notes

10.1 Étalonnage de l'instrument

La balance et le microscope ont été calibrés avant le test, avec un écart de <±1%.

10.2 Qualité de l'échantillon

Assurez-vous que l'échantillon est exempt de fissures et a une composition uniforme.

10.3 Contrôle environnemental

La température de la salle d'essai était de 20 à 25 °C et l'humidité était < 60 %.

10.4 Protection de sécurité

Portez des lunettes de protection pendant le fonctionnement pour éviter les projections de poudre.

11 Annexe (Annexe informative)

Annexe A Propriétés des nuances courantes de carbure cémenté

Tableau A.1 Propriétés typiques des nuances

Marque	WC (%) en poids)	Co (%) en poids)	Densité (g/cm ³)	Porosité(%)	Taille des grains (μm)	Dureté (HRA)	Résistance à la flexion (MPa)	Ténacité à la rupture (MPa·m ^{1/2})
YG6	94,0	6,0	14,90	0,04	0,8-1,0	91,5	2200	10,5
YG8	92,0	8,0	14,70	0,05	1,0-1,2	90,5	2400	11,0
YT15	79,0	6,0	12,50	0,03	0,6-0,8	92,0	1800	9,0

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

Annexe B Analyse des erreurs

B.1 Erreur de l'instrument

Une erreur d'équilibre de $\pm 0,0001$ g affecte une densité $< 0,01$ g/cm³.

B.2 Écart d'échantillon

La composition inégale entraîne une fluctuation de la résistance à la flexion de ± 100 MPa.

B.3 Impact environnemental

Une humidité > 70 % surestime la porosité de 0,01 à 0,03 %.

Annexe C Suggestions d'amélioration

C.1 La fluorescence X (XRF) est utilisée pour analyser la composition avec une précision de $< \pm 0,05$ % en poids.

C.2 Le microscope électronique à balayage (MEB) est utilisé pour mesurer la taille des grains avec une précision de $< \pm 0,05$ μm . C.3 Un système de test automatisé est introduit pour améliorer la cohérence des mesures.

Annexe D Exemples de données de test

Tableau D.1 Données de test de performance de la catégorie YG6

paramètre	Mesure 1	Mesure 2	Mesure 3	valeur moyenne
Densité (g/cm ³)	14,91	14,89	14,90	14,90
Dureté (HRA)	91,4	91,6	91,5	91,5
Résistance à la flexion (MPa)	2180	2220	2200	2200

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

GB/T 34505-2017

Fabrication additive de poudre métallique Spécifications de la méthode de préparation

1 Portée

Cette norme spécifie les spécifications de la méthode de préparation des poudres métalliques destinées à la fabrication additive, notamment le choix des matières premières, le procédé de préparation, le contrôle qualité et les exigences de performance. Cette méthode s'applique aux poudres métalliques (alliages de titane, d'aluminium, acier inoxydable, etc.) utilisées en fabrication additive (fusion sélective par laser SLM, fusion par faisceau d'électrons EBM, etc.) afin de garantir que la granulométrie, la morphologie, la fluidité et la composition chimique de la poudre répondent aux exigences du procédé de fabrication additive. Cette norme peut servir de guide pour le procédé de préparation des poudres, l'acceptation en production et la vérification des performances.

Cette norme ne s'applique pas aux poudres non métalliques ou aux poudres métalliques non destinées à la fabrication additive.

2 Références normatives

Les documents suivants sont essentiels à l'application de la présente norme. Pour tout document référencé daté, seule la version datée s'applique. Pour tout document référencé non daté, la dernière version (y compris tous les amendements) s'applique.

GB/T 1482-2010 Détermination de la fluidité des poudres métalliques - Méthode du rhéomètre à effet Hall

GB/T 5314-2011 Méthode d'échantillonnage de poudre pour la métallurgie des poudres

GB/T 13305 Méthodes d'analyse chimique de l'acier et des ferroalliages

GB/T 19077.1-2008 Mesure de la distribution granulométrique par méthode de diffraction laser
Partie 1 : Généralités

ISO 13320-1:2009 Analyse granulométrique par diffraction laser

ASTM B214-16 Détermination de la masse volumique apparente des poudres métalliques

3 Termes et définitions

Les termes et définitions suivants s'appliquent à cette norme.

3.1 La fabrication additive (AM)

est une technologie qui fabrique des entités en déposant des matériaux couche par couche, notamment SLM, EBM, etc.

3.2 Poudre métallique

Particules de métal ou d'alliage préparées par un procédé spécifique et utilisées comme matières premières pour la fabrication additive.

3.3 Méthode de préparation : Le processus

de transformation des matières premières métalliques en poudres répondant aux exigences de la

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

fabrication additive, y compris la méthode d'atomisation, la méthode de concassage mécanique, etc.

3.4 Distribution granulométrique

Distribution statistique de la taille des particules de poudre, généralement exprimée par D10, D50 ou D90.

3.5 Sphéricité :

Le degré auquel les particules de poudre sont proches de la forme sphérique, ce qui affecte l'uniformité et la fluidité de l'étalement de la poudre.

4 Méthode de préparation

4.1 Sélection des matières premières

Type de matériau : Utiliser des métaux ou alliages de haute pureté (tels que Ti-6Al-4V, acier inoxydable 316L) avec une teneur en impuretés $\leq 0,1$ % en poids.

Forme initiale : Tige métallique, fil ou métal spongieux (comme l'éponge de titane).

Exigences de pureté : teneur en oxygène $\leq 0,2$ % en poids, teneur en azote $\leq 0,05$ % en poids.

4.2 Processus de préparation

4.2.1 Atomisation du gaz

Principe : Le métal en fusion est pulvérisé en fines gouttelettes à travers un gaz à haute pression (tel que l'azote ou l'argon) et refroidi en poudre sphérique.

Paramètres du processus :

Température de fusion : 1500-1800°C (selon le matériau).

Pression du gaz : 2-5 MPa.

Taux de refroidissement : $10^3 - 10^5$ K /s .

Matériaux applicables : alliage de titane, alliage à base de nickel.

Caractéristiques de sortie : taille des particules 10-150 μm , sphéricité $> 0,9$.

4.2.2 Procédé d'électrode rotative à plasma (PREP)

Principe : Une fois l'électrode rotative fondue, elle forme des gouttelettes grâce à la force centrifuge et se refroidit en poudre.

Paramètres du processus :

Vitesse de rotation de l'électrode : 10 000 à 20 000 tr/min.

Puissance : 50-100 kW.

Fluide de refroidissement : Argon ou hélium.

Matériaux applicables : métaux à point de fusion élevé (tels que le tungstène et le molybdène).

Caractéristiques de sortie : taille des particules 20-200 μm , sphéricité $> 0,95$, teneur en oxygène $< 0,1$ % en poids.

4.2.3 Alliage mécanique

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

Principe : Les poudres métalliques sont mélangées et raffinées par broyage à billes à haute énergie.

Paramètres du processus :

Temps de broyage à boulets : 10 à 50 heures.

Rapport bille/matériau : 10:1 à 20:1.

Vitesse de rotation : 300-500 tr/min.

Matériaux applicables : matériaux composites à base d'aluminium.

Caractéristiques de sortie : taille des particules 1-50 μm , morphologie irrégulière.

4.2.4 Méthode de dissolution-précipitation

Principe : Le métal est dissous puis précipité en poudre dans des conditions contrôlées.

Paramètres du processus :

Température de dissolution : 150-200°C.

Pression : 0,5-1,0 MPa.

Rapport solide-liquide : 0,05-0,1 g/ml.

Matériaux applicables : Poudre métallique revêtue de polypropylène.

Caractéristiques de sortie : granulométrie 20-50 μm , sphéricité réglable.

4.3 Post-traitement

Criblage : utilisez un tamis vibrant ou une classification par flux d'air pour contrôler la plage de taille des particules (par exemple 15-45 μm).

Séchage : Sécher à 105 \pm 2°C pendant 1 heure pour éliminer l'humidité.

Traitement de surface : Protéger avec un gaz inerte (tel que Ar) pour réduire l'oxydation.

5. Contrôle de la qualité

5.1 Composition chimique

Déterminé selon GB/T 13305, teneur en oxygène $\leq 0,2$ % en poids, teneur en azote $\leq 0,05$ % en poids, teneur totale en impuretés $\leq 0,3$ % en poids.

5.2 Distribution granulométrique

Déterminé selon GB/T 19077.1-2008, D10 ≥ 10 μm , D50 = 20-50 μm , D90 ≤ 100 μm .

5.3 Morphologie et sphéricité

L'observation au microscope électronique à balayage (MEB) a montré que la sphéricité était $\geq 0,9$.

5.4 Liquidité

Mesuré selon GB/T 1482-2010, le temps d'écoulement est ≤ 35 s/50 g.

5.5 Masse volumique apparente

cm^3 (selon le matériau) tel que mesuré selon la norme ASTM B214-16.

6. Expression des résultats

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

Les propriétés des poudres préparées sont répertoriées sous forme de tableau :

Composition chimique : teneur de chaque élément (% en poids).

Répartition granulométrique : D10, D50, D90 (μm).

Morphologie : Sphéricité et description de l'image MEB.

Coulabilité : Temps d'écoulement (s/50 g).

Masse volumique apparente : g/cm^3 .

Le rapport d'essai doit inclure :

a) Numéro de norme : GB/T 34505-2017 ; b) Type de poudre : marque du matériau, lot ; c) Méthode de préparation : paramètres du processus ; d) Résultats de l'essai : tableau des paramètres de performance ; e) Date de l'essai : par exemple le 21 mai 2025 ; f) Testeur : signature.

7 Précision et biais

7.1 Précision

Distribution granulométrique : Écart de répétabilité $< \pm 5 \mu\text{m}$.

Fluidité : Écart de répétabilité $< \pm 2 \text{ s}$.

Composition chimique : Écart de répétabilité $< \pm 0,1 \%$ en poids.

7.2 Biais

Erreur de l'instrument : l'écart de l'analyseur de taille de particules est de $\pm 2 \mu\text{m}$, affectant la taille des particules $< \pm 5 \%$.

Écart de processus : une fluctuation de la pression du gaz de $\pm 0,5 \text{ MPa}$ entraîne une modification de la distribution granulométrique de $\pm 10 \mu\text{m}$.

Influence environnementale : L'humidité $> 60 \%$ réduit la fluidité de 2 à 5 s.

8 facteurs d'influence

8.1 Pureté des matières premières

Une teneur en oxygène $> 0,2 \%$ en poids augmente l'oxydation de la surface de la poudre et la fluidité diminue de 5 à 10 s.

8.2 Paramètres du processus

Des taux de refroidissement $< 10^3 \text{ K/s}$ ont donné lieu à des particules irrégulières avec une sphéricité $< 0,8$.

Une vitesse d'électrode $< 10\,000 \text{ tr/min}$ entraîne une taille de particules plus grande ($> 200 \mu\text{m}$).

8.3 Post-traitement

Un tamisage irrégulier entraîne un écart de distribution granulométrique de $> 10 \%$.

Un séchage insuffisant réduit la masse volumique apparente de 0,1 à 0,2 g/cm^3 .

9 Application des résultats de la préparation

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

9.1 Processus de fabrication additive

Taille des particules 15-45 μm , fluidité <35 s/50 g, convient à l'impression SLM.

9.2 Optimisation des performances

Sphéricité > 0,9, teneur en oxygène < 0,1 % en poids Améliore la résistance à la traction des pièces imprimées (> 800 MPa).

9.3 Exemples

La poudre Ti-6Al-4V (D50 = 35 μm , fluidité 32 s/50 g) est utilisée pour les aubes de turbines d'aviation avec une rugosité de surface de Ra <10 μm .

10. Notes

10.1 Étalonnage de l'instrument

L'analyseur de taille de particules et le débitmètre à effet Hall ont été étalonnés avant les tests, avec un écart de $\leq \pm 1\%$.

10.2 Contrôle des processus

Assurer une pureté du gaz > 99,99 % pour éviter toute contamination.

10.3 Contrôle environnemental

La température de la salle d'essai était de $23 \pm 2^\circ\text{C}$ et l'humidité était de $50 \pm 5\%$.

10.4 Protection de sécurité

Portez des lunettes de protection pendant le fonctionnement pour éviter que de la poudre métallique ne vole.

11 Annexe (Annexe informative)

Annexe A Paramètres typiques de préparation de poudre métallique

Tableau A.1 Paramètres de processus des différentes méthodes de préparation

méthode	Matériel	Température (°C)	Pression (MPa)	Taille des particules (μm)	Sphéricité	Teneur en oxygène (% en poids)
Atomisation au gaz	Ti-6Al-4V	1700	3.0	20-50	>0,9	<0,15
Méthode PREP	Alliage de tungstène	1800	4.0	30-100	>0,95	<0,10
Alliage mécanique	Matériaux composites à base d'aluminium	Température ambiante	-	1-50	<0,7	<0,20

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

Annexe B Analyse des erreurs

B.1 Erreur de l'instrument

L'analyseur de taille de particules présente un écart de $\pm 2 \mu\text{m}$, affectant la taille des particules de $< \pm 5\%$.

B.2 Écart de processus

Une fluctuation de pression de gaz de $\pm 0,5 \text{ MPa}$ entraîne une variation de la distribution granulométrique de $\pm 10 \mu\text{m}$.

B.3 Impact environnemental

L'humidité $> 60 \%$ réduit la fluidité pendant 2 à 5 s.

Annexe C Suggestions d'amélioration

C.1 L'analyse de la taille des particules au laser a été utilisée pour améliorer la précision à $\pm 1 \mu\text{m}$.

C.2 Un environnement sous vide a été utilisé pour réduire la teneur en oxygène à $< 0,05 \%$ en poids.

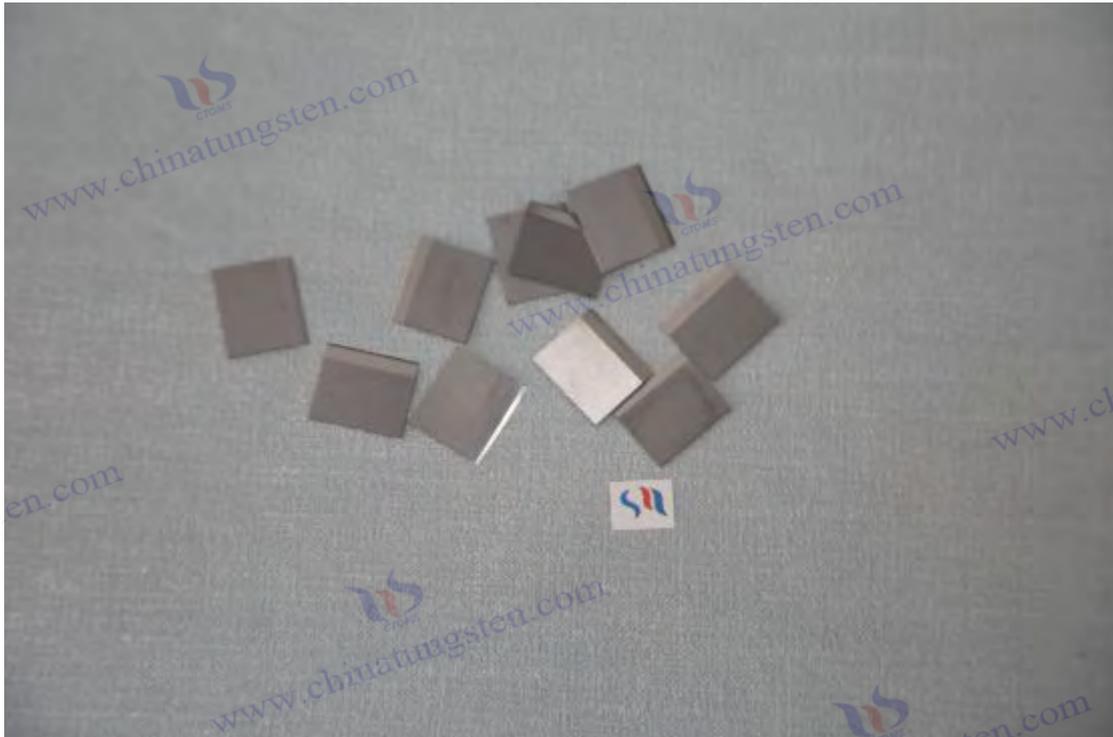
C.3 Un système de surveillance en ligne a été introduit pour optimiser les paramètres du processus.

Annexe D Exemples de données de test

Tableau D.1 Données d'essai de préparation de poudre de Ti-6Al-4V

paramètre	Mesure 1	Mesure 2	Mesure 3	valeur moyenne
D50 (μm)	34,5	35,0	34,8	34,8
Fluidité (s/50 g)	32,2	32,0	32,3	32,2
Teneur en oxygène (% en poids)	0,12	0,13	0,11	0,12

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT



GB/T 26048-2010 Spécification pour le procédé de frittage du carbure cimenté

1 Portée

Cette norme spécifie les spécifications du procédé de frittage du carbure cimenté, incluant la préparation des matières premières, les paramètres du procédé, les exigences relatives aux équipements, le contrôle qualité et les méthodes d'essai de performance. Cette méthode s'applique au frittage du carbure cimenté (tel que les nuances des séries YG, YT et YW) avec du carbure de tungstène (WC) comme phase dure et du cobalt (Co) comme phase liante, principalement utilisé pour la production d'outils de coupe, de moules et de pièces résistantes à l'usure. Cette norme peut servir de guide pour le procédé de frittage, la réception en production et la vérification des performances.

Cette norme ne s'applique pas au frittage des carbures cimentés sans cobalt ni des carbures cimentés sans WC.

2 Références normatives

Les documents suivants sont essentiels à l'application de la présente norme. Pour tout document référencé daté, seule la version datée s'applique. Pour tout document référencé non daté, la dernière version (y compris tous les amendements) s'applique.

GB/T 18376-2014 Méthode d'essai de la microstructure du carbure cimenté

GB/T 3850-2015 Méthode de détermination de la masse volumique du carbure cimenté

GB/T 5169-2013 Méthode d'essai de la porosité du carbure cimenté

GB/T 5243-2008 Méthode de marquage des propriétés des nuances de carbure cimenté

ISO 3327 Méthode de détermination de la résistance à la flexion du carbure cimenté

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

ISO 4499-2 Méthodes de détermination des propriétés mécaniques du carbure cémenté Partie 2 :
Dureté

3 Termes et définitions

Les termes et définitions suivants s'appliquent à cette norme.

3.1 Le métal dur est un matériau composite composé de carbure de tungstène (WC) comme phase dure et de cobalt (Co) comme phase de liaison par métallurgie des poudres.

3.2 Le frittage est

le processus de combinaison de particules de poudre en un solide dense par chauffage, généralement à une température inférieure au point de fusion des principaux composants.

3.3 Frittage en phase liquide

Au cours du processus de frittage, la phase de liaison (comme le cobalt) fond pour former une phase liquide, ce qui favorise le réarrangement et la densification des particules.

3.4 Frittage à l'état solide :

Au cours du processus de frittage, aucune phase liquide n'est formée et la liaison des particules est obtenue uniquement par diffusion à l'état solide.

3.5 Microstructure

Les caractéristiques organisationnelles du carbure cémenté après frittage, y compris la taille des grains, la porosité et la distribution des phases.

4 Procédé de frittage

4.1 Préparation des matières premières

Sélection de poudre : utilisez des poudres WC et Co de haute pureté, pureté WC $\geq 99,8$ %, pureté Co $\geq 99,9$ %, teneur en impuretés $\leq 0,1$ % en poids.

Taille des particules : granulométrie WC 0,5-2,0 μm , granulométrie poudre Co 1-3 μm .

Mélange : Le broyage à boulets sec ou humide est utilisé pour le mélange, avec un rapport boulet/matériau de 5:1 à 10:1 pendant 24 à 48 heures pour assurer l'uniformité (écart $\leq \pm 0,5$ % en poids).

Pressage : Presser le matériau mélangé dans un corps vert à une pression de 100 à 300 MPa et une densité de corps vert de 50 à 60 % de la densité théorique.

4.2 Procédé de frittage

4.2.1 Frittage en une seule étape (frittage sous vide)

Équipement : Four de frittage sous vide, température maximale 1550°C, degré de vide $\leq 10^{-2}$ Pa .

Paramètres du processus :

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

Vitesse de chauffe : 5-10°C/min jusqu'à 600°C (élimination des additifs), maintenir 1 heure.
Continuez à augmenter la température jusqu'à 1400-1450°C (température de frittage en phase liquide) et maintenez-la à cette température pendant 1 à 2 heures.
Vitesse de refroidissement : 5-10°C/min jusqu'à 1000°C, puis refroidissement naturel jusqu'à température ambiante.
Atmosphère : vide ou argon basse pression (< 0,1 MPa).
Nuances applicables : YG6, YG8, adaptées aux outils de coupe.

4.2.2 Frittage en deux étapes (frittage en phase solide + phase liquide)

Équipement : four de frittage sous atmosphère d'hydrogène, four de frittage sous vide.
Paramètres du processus :
Frittage en phase solide : Maintenir à 1300-1350°C (en dessous du point de fusion du cobalt) pendant 1 heure dans une atmosphère d'hydrogène pour favoriser la liaison initiale des particules.
Frittage en phase liquide : Augmenter la température à 1450-1480°C et la maintenir à cette température pendant 30 à 60 minutes sous vide ou sous atmosphère d'argon pour obtenir une densification complète.
Refroidissement : 5-10°C/min jusqu'à 1000°C, puis refroidissement naturel.
Nuances applicables : YT15, YW1, adaptées aux matériaux nécessitant des grains fins.

4.2.3 Pressage isostatique à chaud (frittage HIP)

Équipement : Four de pressage isostatique à chaud, pression maximale 100 MPa, température maximale 1500°C.
Paramètres du processus :
Température de frittage : 1400-1450°C.
Pression : 50-100 MPa.
Temps de maintien au chaud : 1 à 2 heures.
Refroidissement : Laisser refroidir à température ambiante dans le four.
Nuances applicables : Les nuances hautes performances (telles que YG6F) sont utilisées pour les pièces nécessitant une faible porosité.

4.3 Traitement post-frittage

Refroidissement : Contrôlez la vitesse de refroidissement pour éviter les fissures causées par les contraintes thermiques.
Nettoyage de surface : Retirez la couche d'oxyde de surface ou les résidus et nettoyez avec de l'éthanol.
Ajustement de la taille : L'étalonnage de la taille est effectué en fonction du rétrécissement (15 % à 20 %).

5. Contrôle de la qualité

5.1 Composition chimique

Déterminé selon GB/T 5243-2008, l'écart de teneur en WC et Co est $\leq \pm 0,5$ % en poids et la teneur

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

en impuretés est $\leq 0,1$ % en poids.

5.2 Microstructure

Granulométrie : mesurée selon GB/T 18376-2014, granulométrie WC 0,8-1,5 μm .

Porosité : Mesurée selon GB/T 5169-2013, porosité $\leq 0,05$ %.

Répartition des phases : La phase cobalt est répartie uniformément sans ségrégation évidente.

5.3 Propriétés physiques

Densité : Déterminée selon GB/T 3850-2015, densité relative ≥ 99 %.

Retrait : Retrait linéaire 15%-20%, écart $< \pm 1$ %.

5.4 Propriétés mécaniques

Dureté : mesurée selon la norme ISO 4499-2, HRA ≥ 90 .

Résistance à la flexion : mesurée selon la norme ISO 3327, ≥ 2000 MPa.

6 Expression des résultats

Les propriétés après frittage sont répertoriées sous forme de tableau :

Composition chimique : WC, teneur en Co (% en poids).

Microstructure : granulométrie (μm), porosité (%).

Propriétés physiques : masse volumique (g/cm^3), retrait (%).

Propriétés mécaniques : dureté (HRA), résistance à la flexion (MPa).

Le rapport d'essai doit inclure :

- Numéro de norme : GB/T 26048-2010 ;
- Marque : telle que YG6 ;
- Processus de frittage : une étape, deux étapes ou HIP ;
- Paramètres du processus : température, temps, atmosphère ;
- Résultats de l'essai : tableau des paramètres de performance ;
- Date de l'essai : telle que le 21 mai 2025 ;
- Testeur : signature.

7 Précision et biais

7.1 Précision

Taille des grains : Écart de répétabilité $\leq \pm 0,1$ μm .

Porosité : Écart de répétabilité $\leq \pm 0,02$ %.

Dureté : Écart de répétabilité $\leq \pm 0,5$ HRA.

Résistance à la flexion : Écart de répétabilité $\leq \pm 50$ MPa.

7.2 Biais

Erreur de l'instrument : erreur du microscope $\pm 0,1$ μm , affectant la taille des grains $\leq \pm 5$ %.

Écart de processus : une fluctuation de température de $\pm 10^\circ\text{C}$ entraîne une variation de porosité de $\pm 0,03$ %.

Influence environnementale : une teneur en oxygène dans l'atmosphère $> 0,01$ % augmente la porosité de 0,01 à 0,02 %.

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

8 facteurs d'influence

8.1 Température

Les températures $< 1400\text{ }^{\circ}\text{C}$ entraînent une densification insuffisante et une porosité $> 0,1\%$; les températures $> 1480\text{ }^{\circ}\text{C}$ provoquent une croissance anormale des grains ($> 2\text{ }\mu\text{m}$).

8.2 Temps de maintien

Lorsque le temps de maintien est inférieur à 30 minutes, la densification est incomplète et la densité relative est inférieure à 98 %. Lorsque le temps de maintien est supérieur à 2 heures, les grains grossissent et la dureté diminue de 0,5 à 1 HRA.

8.3 Atmosphère

Une teneur en oxygène $> 0,01\%$ entraîne une oxydation de surface et une augmentation de la porosité de 0,02 à 0,05 %.

8.4 Propriétés de la poudre

Une granulométrie $< 0,5\text{ }\mu\text{m}$ augmente la dureté ($> 92\text{ HRA}$) mais diminue la résistance à la flexion ($< 1800\text{ MPa}$).

9 Application des résultats du frittage

9.1 Outils de coupe

YG6 (dureté 91,5 HRA, résistance à la flexion 2200 MPa), utilisé pour les outils de tournage, durée de vie > 5 heures.

9.2 Optimisation des processus

Une porosité $> 0,05\%$ indique que la température de frittage est insuffisante et doit être ajustée à $1450\text{ }^{\circ}\text{C}$.

9.3 Prédiction des performances

Densité relative $> 99\%$, dureté $> 91\text{ HRA}$ correspondant à une augmentation de 20% de la résistance à l'usure.

9.4 Exemples

YG8 (frittage en deux étapes, granulométrie $1,0\text{ }\mu\text{m}$, résistance à la flexion 2400 MPa), utilisé pour les matrices d'emboutissage, durée de vie $> 10\text{ }000$ fois.

10. Notes

10.1 Étalonnage de l'instrument

La température du four de frittage et le degré de vide ont été calibrés avant les tests, avec un écart de $< \pm 1\%$.

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

10.2 Contrôle des processus

Assurez-vous que la pureté de l'atmosphère est > 99,99 % et évitez l'oxydation.

10.3 Contrôle environnemental

La température de la chambre de frittage était de $23 \pm 2^\circ\text{C}$ et l'humidité était < 60%.

10.4 Protection de sécurité

Portez des lunettes de protection pendant le fonctionnement pour éviter que la poudre ne vole.

11 Annexe (Annexe informative)

Annexe A Paramètres typiques du processus de frittage

Tableau A.1 Paramètres de frittage des différentes nuances

Marque	Méthode de frittage	Température (°C)	Temps de maintien (min)	atmosphère	Densité relative (%)	Taille des grains (μm)
YG6	Frittage sous vide	1450	60	vide	99,5	0,8-1,0
YG8	Frittage en deux étapes	1350+1480	60+30	Hydrogène + vide	99,3	1,0-1,2
YT15	Frittage HIP	1450	90	Argon pression +	99,8	0,6-0,8

Annexe B Analyse des erreurs

B.1 Erreur de l'instrument

Un écart de température de $\pm 10^\circ\text{C}$ affecte la porosité de $\leq \pm 0,03\%$.

B.2 Écart de processus

Un écart de temps de maintien de ± 5 minutes entraîne un changement de densité relative de $\pm 0,5\%$.

B.3 Impact environnemental

Une teneur en oxygène atmosphérique > 0,01 % augmente la porosité de 0,01 à 0,02 %.

Annexe C Suggestions d'amélioration

C.1 Utiliser la surveillance de la température en ligne pour contrôler l'écart $\leq \pm 5^\circ\text{C}$.

C.2 Utiliser un gaz inerte de haute pureté pour réduire la teneur en oxygène à < 0,005%. C.3

Introduire une technologie de refroidissement rapide pour réduire la croissance des grains.

Annexe D Exemples de données de test

Tableau D.1 Données d'essai de frittage YG6

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

paramètre	Mesure 1	Mesure 2	Mesure 3	valeur moyenne
Densité relative (%)	99,4	99,5	99,6	99,5
Taille des grains (μm)	0,9	0,8	1.0	0,9
Dureté (HRA)	91,4	91,6	91,5	91,5

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