

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

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

Partie 3 : Optimisation des performances du carbure cimenté

Chapitre 8 : Corrosion et résistance à haute température du carbure cimenté

Le carbure cimenté est un matériau composite fabriqué par métallurgie des poudres. Sa phase dure principale est le carbure de tungstène (WC), tandis que la phase de liaison est le cobalt (Co), le nickel (Ni). Ses excellentes performances le rendent largement utilisé dans les outils de coupe, les équipements miniers et les pièces résistantes à l'usure. Nous présentons ci-dessous brièvement son concept et ses caractéristiques typiques, tant en termes de résistance à la corrosion que de résistance aux hautes températures.

Résistance à la corrosion du carbure cimenté

La résistance à la corrosion désigne la capacité du carbure cimenté à résister à l'érosion chimique en milieu corrosif (tels que les solutions acides, alcalines et salines). Cette propriété est principalement influencée par la composition et la microstructure du matériau.

La phase de liaison du carbure cimenté joue un rôle essentiel dans sa résistance à la corrosion. Le carbure cimenté avec du cobalt comme phase de liaison (comme la série YG) présente de faibles performances en milieu acide. Par exemple, dans les environnements contenant de l'acide sulfurique ou de l'acide chlorhydrique, le cobalt se corrode facilement, entraînant une dissolution progressive de la surface du matériau. Prenons l'exemple du carbure YG6 (contenant 6 % de cobalt) : sa vitesse de corrosion dans de l'acide chlorhydrique à 10 % à température ambiante est d'environ 0,1 à 0,2 mm/an, tandis qu'il se corrode peu en milieu faiblement alcalin ou neutre (comme une solution d'hydroxyde de sodium à 10 %). En revanche, le carbure cimenté avec du nickel comme phase de liaison (comme la série YN) présente une meilleure résistance à la corrosion, notamment en milieu alcalin et oxydant. Il est plus stable et convient à une utilisation dans des conditions difficiles comme les environnements marins. De plus, des défauts de microstructure peuvent également affecter significativement la résistance à la corrosion. S'il y a une porosité élevée dans le carbure cimenté, ou s'il contient des impuretés telles que du carbone libre et de la phase η , ces défauts deviendront le point de départ de la corrosion et accéléreront la dégradation du matériau.

Résistance à haute température du carbure cimenté

La résistance à haute température désigne la capacité du carbure cimenté à conserver sa dureté, sa résistance mécanique et sa résistance à l'oxydation dans un environnement à haute température. Cette caractéristique est également influencée par la composition et la température.

Le carbure cimenté offre de bonnes performances à basse température et peut généralement maintenir une dureté et une résistance élevées en dessous de 600 °C. Par exemple, l'YG8 (contenant 8 % de cobalt) peut conserver une dureté d'environ 1 200 HV à 600 °C, soit une baisse de seulement 20 % environ. Cependant, lorsque la température dépasse 800 °C, la phase de liaison (comme le

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

cobalt) commence à se ramollir, ce qui entraîne une diminution significative de la résistance et de la dureté globales du matériau. Prenons l'exemple de l'YG8 : sa dureté peut chuter jusqu'à 500-600 HV à 1 000 °C. De plus, la résistance à l'oxydation du carbure cimenté à haute température est également mise à rude épreuve. Le carbure de tungstène se transforme en oxyde de tungstène (WO_3) dans un environnement oxydant à haute température, ce qui provoque un écaillage de la surface et affecte sa durée de vie. En revanche, le carbure cimenté avec ajout de carbure de titane (TiC) (comme le YT15) présente une meilleure résistance à l'oxydation à 800°C, mais sa résistance diminuera toujours de 20 à 30 %.

La résistance à la corrosion et aux températures élevées du carbure cimenté sont des indicateurs clés de son application en environnements difficiles. En termes de résistance à la corrosion, le carbure cimenté au nickel est plus performant dans divers milieux, tandis que le carbure cimenté au cobalt est sensible à la corrosion en milieu acide. En termes de résistance aux températures élevées, le carbure cimenté est stable en dessous de 600 °C, mais sa dureté et sa résistance à l'oxydation diminuent considérablement à des températures plus élevées. Ces caractéristiques déterminent l'applicabilité du carbure cimenté dans différents scénarios d'application et constituent un critère important pour son choix et son utilisation.

Le carbure cimenté ($WCCo$) dans des environnements difficiles est essentiel à son application dans les domaines de la chimie, de la marine et de l'aéronautique. Par exemple, dans les solutions acides ($pH < 3 \pm 0,1$), le carbure cimenté doit résister à une forte attaque chimique ; dans le brouillard salin marin ($> 1\,000$ heures ± 100 heures), il doit empêcher la piqure ; dans les moteurs d'avion ($> 1\,000$ °C ± 10 °C), il doit maintenir sa résistance et sa résistance à l'oxydation. Cependant, l'activité électrochimique de la phase de liaison Co (potentiel de corrosion $E_{corr} \sim 0,3\,V \pm 0,02\,V$ par rapport à SCE) induit facilement de la corrosion, et le WC est oxydé à haute température pour former WO_3 (épaisseur $> 1\,\mu m \pm 0,1\,\mu m$), ce qui entraîne une dégradation des performances. La stratégie d'optimisation doit partir de la microstructure (grain $WC\,0,52\,\mu m \pm 0,01\,\mu m$, $Co\,6\% \pm 1\%$), des additifs (tels que $Cr_3C_2\,0,5\% \pm 0,01\%$) et de la protection de surface (épaisseur du revêtement $520\,\mu m \pm 0,1\,\mu m$) pour obtenir une amélioration synergique de la résistance à la corrosion et de la résistance aux hautes températures.

discute du comportement et du chemin d'optimisation du $WCCo$ dans les environnements acides, de brouillard salin et à haute température sous quatre aspects : **mécanisme de résistance à la corrosion**, **performances à haute température**, **Méthode d'optimisation des performances** et **tests et évaluation**. Le mécanisme de résistance à la corrosion révèle la nature de la corrosion grâce à la théorie électrochimique (courbe de Tafel, $i_{corr} < 10^{-6}\,A/cm^2 \pm 10^{-7}\,A/cm^2$) ; les performances à haute température se concentrent sur la résistance à l'oxydation (gain de poids $< 0,5\,mg/cm^2 \pm 0,05\,mg/cm^2$) et la fatigue thermique (fissure $< 0,1\,mm \pm 0,01\,mm$) ; la méthode d'optimisation propose une phase de liaison à base de Ni (taux de corrosion $< 0,01\,mm/an \pm 0,001\,mm/an$) et un revêtement Cr_3C_2 (dureté $> HV\,1500 \pm 30$) ; les tests et l'évaluation combinent les normes ISO 9227, ASTM G59 et le test de choc thermique (> 500 fois ± 50 fois) pour fournir une base quantitative.

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

Français Par exemple, la perte de poids du WC à base de Ni (Ni 10 % $\pm$ 1 %) dans le brouillard salin est $< 0,08 \text{ mg/cm}^2 \pm 0,01 \text{ mg/cm}^2$; la dureté des outils revêtus de Cr_3C_2 à $1\,000\text{ }^\circ\text{C} \pm 10\text{ }^\circ\text{C}$ est $> \text{HV } 1\,200 \pm 30$ et la durée de vie est $> 5\,000 \text{ heures} \pm 500 \text{ heures}$. Ce chapitre est étroitement lié au chapitre 6 (Taux d'usure du revêtement $< 0,06 \text{ mm}^3/\text{N} \cdot \text{m} \pm 0,01 \text{ mm}^3/\text{N} \cdot \text{m}$) et au chapitre 7 ($K_1 < 820 \text{ MPa} \cdot \text{m}^{1/2} \pm 0,5$), jetant ainsi les bases du chapitre 9 (Matériaux composites multifonctionnels).

8.1 Mécanisme de résistance à la corrosion du carbure cimenté

La résistance à la corrosion du carbure cimenté est essentielle à sa longévité dans les environnements chimiques agressifs (acides, brouillard salin et alcalins). Sa perte de masse est généralement contrôlée à $0,1 \text{ mg/cm}^2 \pm 0,01 \text{ mg/cm}^2$, ce qui lui confère une bonne stabilité et lui permet de résister efficacement à la corrosion en milieu acide ($\text{pH} < 3 \pm 0,1$), brouillard salin (concentration en NaCl 5 % $\pm 0,1$ %) et alcalin ($\text{pH} > 10 \pm 0,1$). Le processus de corrosion est principalement entraîné par l'activité électrochimique de la phase de liaison (comme le cobalt, Co), et sa densité de courant de corrosion (i_{corr}) est d'environ $10^{-5} \text{ A/cm}^2 \pm 10^{-6} \text{ A/cm}^2$, provoquant la dissolution préférentielle du cobalt, ce qui à son tour provoque la chute des particules de carbure de tungstène (WC) (taille $0,52 \mu\text{m} \pm 0,01 \mu\text{m}$), formant des piqûres de corrosion d'un diamètre d'environ $110 \mu\text{m} \pm 0,1 \mu\text{m}$. Français Bien que le WC lui-même ait une stabilité chimique extrêmement élevée et que sa vitesse de dissolution soit extrêmement faible ($< 10^{-8} \text{ g/cm}^2 \cdot \text{h} \pm 10^{-9} \text{ g/cm}^2 \cdot \text{h}$), si la force de liaison entre le WC et l'interface de phase de liaison ($> 100 \text{ MPa} \pm 10 \text{ MPa}$) est insuffisante, un pelage est susceptible de se produire à l'interface, accélérant considérablement la défaillance par corrosion. Afin d'améliorer la résistance à la corrosion, il est nécessaire de réduire la densité de courant de corrosion de la phase de liaison (cible $i_{\text{corr}} < 10^{-6} \text{ A/cm}^2 \pm 10^{-7} \text{ A/cm}^2$), améliorant sa stabilité électrochimique (potentiel de corrosion $E_{\text{corr}} > 0,2 \text{ V} \pm 0,02 \text{ V}$ par rapport à SCE) et améliorant la force de liaison de l'interface WC-Co.

Du fait du comportement électrochimique du WC et de la phase de liaison, la corrosion est essentiellement un processus électrochimique. Le cobalt agit comme anode pour la dissolution oxydative ($\text{Co} \rightarrow \text{Co}^{2+} + 2\text{e}^-$), tandis que le WC, en raison de sa grande inertie chimique, participe souvent à la réaction en tant que cathode. Cet effet galvanique est le principal moteur de la corrosion. En milieu acide ($\text{pH} < 3 \pm 0,1$), les ions H^+ accélèrent la réaction de dissolution du cobalt, tandis qu'en brouillard salin (NaCl 5 % $\pm 0,1$ %), les ions Cl^- peuvent détruire le film de passivation à la surface du cobalt, entraînant une augmentation des piqûres. L'analyse microscopique montre que les piqûres de corrosion sont principalement concentrées à l'interface WC-Co, indiquant qu'une liaison interfaciale insuffisante est le facteur clé de la défaillance. Ce mécanisme a été vérifié plus avant par l'étude de la théorie électrochimique et des normes d'essai (telles que ISO 9227, ASTM G59). Dans les cas réels, le taux de perte de poids du carbure cimenté WC-10Co dans un environnement de brouillard salin est de $0,09 \text{ mg/cm}^2 \pm 0,01 \text{ mg/cm}^2$, ce qui reflète la limitation de sa résistance à la corrosion.

En général, le mécanisme de résistance à la corrosion du carbure cimenté implique principalement

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

la dissolution électrochimique de la phase de liaison et la rupture de l'interface , qui se manifeste par des piqûres et un détachement de particules en milieu acide et en brouillard salin. La réduction de la densité de courant de corrosion, l'amélioration de la stabilité électrochimique et le renforcement de la force de liaison de l'interface permettent d'améliorer efficacement sa résistance à la corrosion, ce qui étaye théoriquement son application en environnements difficiles.

8.1.1 Comportement électrochimique de la phase dure du carbure de tungstène (WC) et de la phase liante dans le carbure cimenté

Principe et aperçu technique

La résistance à la corrosion du carbure cimenté est déterminée par le comportement électrochimique de la phase dure du WC et de la phase de liaison au cobalt, avec un objectif de vitesse de corrosion $< 0,01 \text{ mm} \pm 0,001 \text{ mm/ an}$. La phase dure du carbure cimenté, le carbure de tungstène (WC), , présente une excellente stabilité chimique dans les environnements acides et neutres ($E_{\text{corr}} 0,1 \text{ V} \pm 0,02 \text{ V}$ par rapport à l'ECS), avec une dissolution quasi nulle (vitesse $< 10^{-8} \text{ g/cm}^2 \cdot \text{h} \pm 10^{-9} \text{ g/cm}^2 \cdot \text{h}$). En revanche, le Co est sensible à l'oxydation électrochimique ($\text{Co} \rightarrow \text{Co}^{2+} + 2e^-$), avec un courant de corrosion $i_{\text{corr}} 10^{-5} \text{ A/cm}^2 \pm 10^{-6} \text{ A/cm}^2$, formant des piqûres de corrosion (diamètre $110 \mu\text{m} \pm 0,1 \mu\text{m}$), ce qui fragilise fortement l' interface WCCo (force de liaison $< 100 \text{ MPa} \pm 10 \text{ MPa}$). Le comportement électrochimique suit l' équation de Butler-Volmer :

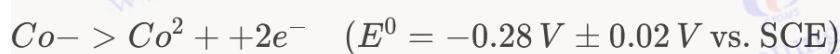
$$i = i_0 \cdot \left[\exp \left(\frac{(1-\alpha)nF\eta}{RT} \right) - \exp \left(-\frac{\alpha nF\eta}{RT} \right) \right]$$

Où $i_0 10^{-6} \text{ A/cm}^2 \pm 10^{-7} \text{ A/cm}^2$ (densité de courant d'échange), $\alpha \sim 0,5 \pm 0,05$ (coefficient de transfert) et η est la surtension ($< 0,1 \text{ V} \pm 0,01 \text{ V}$). L'objectif d'optimisation est d'augmenter E_{corr} et de réduire i_{corr} .

Le test électrochimique utilise un système à trois électrodes (électrode de travail WCCo , électrode de référence SCE, électrode auxiliaire Pt) et l'électrolyte comprend $3,5 \% \pm 0,1 \%$ de NaCl (simulant un environnement marin) et $0,1 \text{ M} \pm 0,01 \text{ M}$ $\text{H}_2 \text{SO}_4$ (simulant un environnement acide). L'équipement de test offre une grande précision (potentiel $\pm 0,001 \text{ V}$, courant $\pm 10^{-9} \text{ A}$) pour garantir des données fiables. Par exemple, le WC10Co (grain $0,5 \mu\text{m} \pm 0,01 \mu\text{m}$) dans $\text{H}_2 \text{SO}_4$ a un i_{corr} d'environ $10^{-5} \text{ A/cm}^2 \pm 10^{-6} \text{ A/cm}^2$, et après ajout de $\text{Cr}_3 \text{C}_2$ ($0,5 \% \pm 0,01 \%$), il tombe à $10^{-6} \text{ A/cm}^2 \pm 10^{-7} \text{ A/cm}^2$, et la résistance à la corrosion est considérablement améliorée. Cette section fournit des conseils complets à travers la théorie, les expériences et les stratégies d'optimisation.

Mécanisme et analyse

La grande stabilité du WC est due à son énergie de liaison élevée ($700 \text{ kJ/mol} \pm 10 \text{ kJ/mol}$), et il est quasiment insoluble à un pH de $212 \pm 0,1$ (vitesse $< 10^{-8} \text{ g/cm}^2 \cdot \text{h} \pm 10^{-9} \text{ g/cm}^2 \cdot \text{h}$). La réaction de corrosion du Co est la suivante :



COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

Français Dans un environnement acide, H^+ accélère la dissolution du Co (taux $10^{-6} \text{ g/cm}^2 \cdot \text{h} \pm 10^{-7} \text{ g/cm}^2 \cdot \text{h}$), formant des piqûres de corrosion (profondeur $15 \mu\text{m} \pm 0,1 \mu\text{m}$). Dans un brouillard salin neutre, Cl^- induit des piqûres (diamètre des piqûres $110 \mu\text{m} \pm 0,1 \mu\text{m}$), et i_{corr} augmente de $20 \% \pm 5 \%$. L'analyse SEM montre que la corrosion est principalement causée par la dissolution du Co, et que les particules de WC tombent en raison de la perte de support du Co (taux de chute $\sim 0,1 \% \pm 0,02 \%$), ce qui entraîne une augmentation de la rugosité de surface R_a ($> 0,1 \mu\text{m} \pm 0,01 \mu\text{m}$).

WCCo est critique pour la corrosion. Lorsque l'énergie d'interface est de $1 \text{ J/m}^2 \pm 0,1 \text{ J/m}^2$, la force de liaison est $> 100 \text{ MPa} \pm 10 \text{ MPa}$ et le taux de décollement des particules diminue de $50 \% \pm 5 \%$. Une granulométrie de $0,5 \mu\text{m} \pm 0,01 \mu\text{m}$ augmente la densité des joints de grains ($> 10^{14} \text{ m}^{-2} \pm 10^{13} \text{ m}^{-2}$) et améliore la résistance à la corrosion, mais la répartition inégale du Co (écart $> 0,5 \% \pm 0,1 \%$) aggrave la corrosion locale (i_{corr} augmente de $30 \% \pm 5 \%$). En ajoutant Cr_3C_2 ($0,5 \% \pm 0,01 \%$) pour former une couche de passivation Cr_2O_3 (épaisseur $10 \text{ nm} \pm 1 \text{ nm}$), E_{corr} augmente à $0,15 \text{ V} \pm 0,02 \text{ V}$, et i_{corr} diminue de $40 \% \pm 5 \%$. L'analyse XPS a confirmé la formation de Cr_2O_3 (pic Cr 3p $\sim 577 \text{ eV} \pm 0,1 \text{ eV}$), qui a efficacement inhibé la dissolution du Co.

Analyse des facteurs affectant la résistance à la corrosion du carbure cémenté

Le carbure cémenté est composé de carbure de tungstène (WC) comme phase dure principale et de cobalt (Co) et d'autres métaux comme phase de liaison. Sa résistance à la corrosion est essentielle dans les environnements chimiques agressifs tels que les acides, le brouillard salin et les bases. Cependant, son comportement à la corrosion est influencé par de multiples facteurs, tels que les propriétés intrinsèques du matériau (teneur en Co, granulométrie, ajouts, rugosité de surface) et les paramètres environnementaux externes (composition de l'électrolyte, pH, concentration ionique). À partir de ces facteurs clés, combinés à des données électrochimiques, des analyses microscopiques, des simulations environnementales et des cas réels, le mécanisme d'influence de la résistance à la corrosion du carbure cémenté est exploré en profondeur, ainsi que l'interaction entre différents facteurs et leur influence sur les performances de service du matériau.

(1) Effet de la teneur en cobalt (Co) du carbure cémenté comme phase de liaison

Le cobalt (Co) de la phase de liaison est le principal composant corrosif actif du carbure cémenté, et sa teneur détermine directement la tendance à la corrosion électrochimique du matériau. Des études ont montré que lorsque la teneur en Co est de $10 \% \pm 1 \%$, la densité de courant de corrosion (i_{corr}) est d'environ $10^{-5} \text{ A/cm}^2 \pm 10^{-6} \text{ A/cm}^2$, ce qui indique une certaine résistance à la corrosion en milieu acide ou en brouillard salin. Cependant, lorsque la teneur en Co augmente à $12 \% \pm 1 \%$, i_{corr} Français augmente d'environ $50 \% \pm 5 \%$, et la résistance à la corrosion diminue significativement. La principale raison de ce phénomène est que l'augmentation de la teneur en Co conduit à une augmentation de la surface exposée au milieu corrosif, ce qui accélère la réaction de dissolution anodique ($\text{Co} \rightarrow \text{Co}^{2+} + 2e^-$). De plus, une teneur élevée en Co réduit également la capacité de passivation du matériau, le rendant plus sensible aux piqûres en présence d'ions Cl^- . Prenons l'échantillon de WC-12Co comme exemple, après exposition à une solution de $0,1 \text{ M H}_2\text{SO}_4$ pendant 24 heures, la profondeur des piqûres de corrosion a atteint $10 \mu\text{m} \pm 1 \mu\text{m}$, et des zones

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

de piqûres denses se sont formées à la surface, indiquant que la teneur élevée en Co a considérablement aggravé la corrosion locale.

(2) Effet de la granulométrie

La granulométrie du WC joue un rôle important dans la résistance à la corrosion du carbure cimenté en affectant la densité des joints de grains et la voie de pénétration du milieu corrosif. Lorsque la granulométrie est petite (par exemple, $0,51 \mu\text{m} \pm 0,01 \mu\text{m}$), le nombre de joints de grains est important, ce qui disperse la voie de pénétration du milieu corrosif, et les piqûres de corrosion sont moins nombreuses et moins profondes (profondeur des piqûres $< 5 \mu\text{m} \pm 0,5 \mu\text{m}$). Les grains fins assurent également une meilleure répartition de l'interface WC-Co et limitent dans une certaine mesure la dissolution du cobalt, ce qui réduit le degré de défaillance du matériau. Cependant, lorsque la granulométrie atteint $2 \mu\text{m} \pm 0,01 \mu\text{m}$, la densité des joints de grains diminue, la concentration locale de corrosion s'intensifie et la profondeur des piqûres de corrosion augmente d'environ $20 \% \pm 5 \%$. La granulométrie plus importante entraîne une réduction de la surface exposée de l'interface WC-Co, et la dissolution du cobalt se concentre sur un nombre restreint d'interfaces, formant des piqûres de corrosion plus profondes. En milieu acide notamment, les ions H^+ sont plus susceptibles de pénétrer le long des joints de grains, accélérant ainsi la dégradation du matériau.

(3) Effet des additifs

Le carbure de chrome (Cr_3C_2) optimise considérablement la résistance à la corrosion du carbure cimenté en modifiant les propriétés chimiques et l'état de surface de la phase de liaison. Les données expérimentales montrent que l'ajout de $0,5 \% \pm 0,01 \%$ de Cr_3C_2 peut réduire i_{corr} d'environ $40 \% \pm 5 \%$, grâce à la réaction du Cr avec l'oxygène pendant le frittage à haute température pour former une couche de passivation dense en Cr_2O_3 , qui bloque le contact direct entre les milieux corrosifs (tels que H^+ ou Cl^-) et le cobalt. En prenant l'exemple de l'échantillon WC-10Co avec Cr_3C_2 , la profondeur de la piqûre de corrosion dans une solution à $0,1 \text{ M H}_2\text{SO}_4$ n'est que de $3 \mu\text{m} \pm 0,5 \mu\text{m}$, ce qui est nettement inférieur à celle du WC-12Co ($10 \mu\text{m} \pm 1 \mu\text{m}$) sans Cr_3C_2 . La spectrométrie dispersive en énergie (EDS) montre en outre que la couche de Cr_2O_3 mesure environ $0,1$ à $0,2 \mu\text{m}$. épais, isolant efficacement le milieu corrosif. Cependant, lorsque la teneur en Cr_3C_2 dépasse $1 \% \pm 0,01 \%$, des phases cassantes excessives (telles que la phase η , représentant $> 1 \% \pm 0,2 \%$) peuvent se former dans le matériau, entraînant une diminution de la ténacité à la rupture (K_{IC}) d'environ $10 \% \pm 2 \%$, ce qui constitue une menace potentielle pour les applications soumises à des contraintes mécaniques (telles que les outils de coupe).

(4) Influence de l'environnement électrolytique

Les propriétés chimiques de l'électrolyte sont les principaux facteurs externes affectant la résistance à la corrosion du carbure cimenté. En milieu acide ($\text{pH} < 3 \pm 0,1$), la concentration en ions H^+ est élevée, ce qui accélère la réaction de dissolution anodique du cobalt. i_{corr} augmente d'environ $30 \% \pm 5 \%$, et la vitesse de corrosion augmente significativement. En particulier dans les acides forts (tels que $\text{HCl } 1 \text{ M}$), la vitesse d'expansion des piqûres de corrosion locales peut atteindre $0,5 \mu\text{m} / \text{h} \pm 0,05 \mu\text{m} / \text{h}$. Dans un environnement de brouillard salin à forte concentration (concentration de $\text{NaCl} > 5 \% \pm 0,1 \%$), les ions Cl^- , en tant qu'anions fortement pénétrants, détruisent le film de

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

passivation à la surface du cobalt (tel que $\text{Co}(\text{OH})_2$ ou CoO), induisent des piqûres, et la vitesse de piqûre augmente d'environ $25\% \pm 5\%$. Cl^- attaque préférentiellement l'interface WC-Co par adsorption et diffusion, provoquant une augmentation de la densité des piqûres de corrosion à $15\text{--}20 / \text{mm}^2$. De plus, l'augmentation de la température de l'électrolyte (par exemple, $50^\circ\text{C} \pm 2^\circ\text{C}$) amplifie encore ces effets, augmentant i_{corr} de $10\% \pm 2\%$ supplémentaires, ce qui aggrave la dégradation du matériau.

(5) Influence de la rugosité de surface

La rugosité de surface (R_a) affecte directement la résistance à la corrosion du carbure cimenté en modifiant les caractéristiques de contact entre le matériau et le milieu corrosif. Lorsque la rugosité de surface est faible ($R_a < 0,05 \mu\text{m} \pm 0,01 \mu\text{m}$), la surface est lisse, les défauts (tels que les microfissures et les piqûres) sont réduits, la surface de contact réelle avec le milieu corrosif est réduite, i_{corr} reste faible et la résistance à la corrosion est bonne. Cependant, lorsque R_a dépasse $0,1 \mu\text{m} \pm 0,01 \mu\text{m}$, les défauts de surface augmentent significativement et le milieu corrosif est facilement retenu dans ces zones, formant des micro-batteries électrochimiques locales, ce qui entraîne une augmentation de i_{corr} d'environ $15\% \pm 3\%$. Les surfaces très rugueuses peuvent également induire une concentration de contraintes, en particulier dans les environnements de corrosion cyclique (tels que les tests de cycle de brouillard salin), accélérant l'expansion et la profondeur des piqûres de corrosion et affectant sérieusement la durée de vie du matériau.

(6) Interactions entre les facteurs

Les facteurs ci-dessus n'influencent pas indépendamment, mais déterminent conjointement la résistance à la corrosion du carbure cimenté par des interactions complexes. Par exemple, lorsqu'une teneur élevée en Co ($> 12\% \pm 1\%$) est associée à une surface rugueuse ($R_a > 0,1 \mu\text{m} \pm 0,01 \mu\text{m}$), i_{corr} peut augmenter jusqu'à $5 \times 10^{-5} \text{ A/cm}^2 \pm 10^{-6} \text{ A/cm}^2$, et la profondeur des piqûres de corrosion augmente jusqu'à $15 \mu\text{m} \pm 1 \mu\text{m}$, ce qui est bien plus élevé que l'effet d'un seul facteur. L'ajout de Cr_3C_2 ($0,5\% \pm 0,01\%$) peut compenser partiellement les effets néfastes de l'augmentation de la teneur en Co, mais dans un environnement acide avec un $\text{pH} < 3 \pm 0,1$, l'effet protecteur de la couche Cr_2O_3 peut être affaibli par l'attaque H^+ . De plus, l'effet de couplage entre la taille des grains et l'environnement électrolytique est significatif. Les grains fins ($0,51 \mu\text{m} \pm 0,01 \mu\text{m}$) fonctionnent bien à de faibles concentrations de Cl^- , mais une corrosion par piqûres peut encore se produire dans un brouillard salin à forte concentration ($\text{NaCl} > 5\% \pm 0,1\%$), indiquant les limites des conditions environnementales sur la protection des joints de grains.

(7) Analyse de cas complète

Français En prenant des échantillons de WC-12Co et de WC-10Co avec Cr_3C_2 ajouté comme exemples, après avoir été exposés à une solution de $0,1\text{M H}_2\text{SO}_4$ pendant 24 heures, la profondeur de la piqûre de corrosion du WC-12Co a atteint $10 \mu\text{m} \pm 1 \mu\text{m}$, et la surface a montré des caractéristiques de piqûres évidentes. L'analyse EDS a montré que la teneur en Co était significativement réduite au fond de la piqûre. En revanche, la profondeur de la piqûre de corrosion du WC-10Co a été réduite à $3 \mu\text{m} \pm 0,5 \mu\text{m}$ en raison de l'ajout de $0,5\%$ de Cr_3C_2 , et l'épaisseur de la couche de Cr_2O_3 était d'environ $0,15 \mu\text{m}$, ce qui a inhibé avec succès la dissolution du cobalt et

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

la libération des particules de WC. Des tests supplémentaires dans un environnement de brouillard salin à 5 % de NaCl ont montré que le taux de perte de poids du WC-12Co a atteint $0,12 \text{ mg/cm}^2 \pm 0,01 \text{ mg/cm}^2$, tandis que le WC-10Co n'est que de $0,07 \text{ mg/cm}^2 \pm 0,01 \text{ mg/cm}^2$, la résistance à la corrosion a augmenté d'environ $40 \% \pm 5 \%$, ce qui a permis de vérifier l'additif et le Co Effets synergiques de l'optimisation du contenu.

La résistance à la corrosion du carbure cimenté dépend de nombreux facteurs, notamment la teneur en Co, la granulométrie, les additifs, l'environnement électrolytique et la rugosité de surface. Une teneur élevée en Co et une surface rugueuse intensifient la corrosion, tandis qu'une granulométrie fine et une quantité appropriée de Cr_3C_2 améliorent la résistance à la corrosion. Les environnements acides et salins accélèrent la formation de piqûres. L'interaction de ces facteurs complexifie encore le comportement à la corrosion. L'optimisation de la conception des matériaux et des conditions d'utilisation permet d'améliorer efficacement la résistance à la corrosion du carbure cimenté dans les secteurs chimique, maritime et autres.

Stratégie d'optimisation de l'influence de la résistance à la corrosion du carbure cimenté

Afin de réduire la densité de courant de corrosion (i_{corr}) de carbure cimenté à $10^{-6} \text{ A/cm}^2 \pm 10^{-7} \text{ A/cm}^2$ Pour répondre aux exigences de service à long terme dans des environnements difficiles tels que l'acide, le brouillard salin et les bases, il est nécessaire d'améliorer systématiquement sa résistance à la corrosion par une optimisation complète de la composition du matériau, des additifs, du traitement de surface, du processus de frittage et des méthodes d'essai. À partir de ces aspects clés, combinés aux données électrochimiques, aux paramètres du processus et aux cas réels, la stratégie d'optimisation et son effet sont élaborés en détail.

(1) Optimisation des ingrédients

En contrôlant précisément la composition chimique du carbure cimenté, la zone d'exposition du cobalt (Co) de la phase de liaison peut être efficacement réduite, ce qui diminue son activité électrochimique. Il est recommandé de maintenir la teneur en Co entre $8 \% \pm 1 \%$, tout en maintenant la granulométrie du WC à $0,51 \mu\text{m} \pm 0,01 \mu\text{m}$. Cette stratégie permet de réduire i_{corr} en diminuant la fraction volumique de Co (zone d'exposition cible $< 10 \% \pm 1 \%$) afin de limiter son contact avec les milieux corrosifs (tels que H^+ ou Cl^-). La finesse des grains augmente non seulement la densité des joints de grains et disperse les contraintes de corrosion, mais améliore également l'uniformité de l'interface WC-Co et réduit la tendance à la corrosion locale. Prenons l'exemple du WC-10Co : une fois la teneur en Co optimisée, le taux de corrosion en milieu acide est plus faible et la formation de piqûres de corrosion superficielle est considérablement réduite, ce qui prolonge la durée de vie du matériau.

(2) Additifs

L'ajout d'une quantité appropriée de carbure de chrome (Cr_3C_2) est un moyen efficace d'améliorer la résistance à la corrosion du carbure cimenté. La quantité d'ajout recommandée est de $0,5 \% \pm 0,01 \%$. Lors du frittage à haute température, le Cr réagit avec l'oxygène pour former une couche de passivation dense de Cr_2O_3 . Ce film protecteur, d'une épaisseur d'environ $0,1 \text{ à } 0,2 \mu\text{m}$, peut bloquer

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

efficacement la corrosion du cobalt de la phase de liaison par le milieu corrosif et réduire i_{corr} Français d'environ $40 \% \pm 5 \%$. En prenant l'échantillon WC-10Co avec Cr_3C_2 ajouté comme exemple, dans le test dans une solution de $0,1 \text{ MH}_2\text{SO}_4$, sa résistance à la corrosion est améliorée d'environ $40 \% \pm 5 \%$ par rapport à l'échantillon sans ajout, et la profondeur de la piqure de corrosion de surface est réduite de $5 \mu\text{m} \pm 0,5 \mu\text{m}$ à $3 \mu\text{m} \pm 0,5 \mu\text{m}$. L'analyse du spectre dispersif en énergie (EDS) a en outre confirmé que la présence de la couche de Cr_2O_3 réduisait significativement la vitesse de dissolution du cobalt et améliorait la stabilité du matériau dans un environnement acide.

(3) Traitement de surface

L'optimisation de l'état de surface est essentielle pour réduire les piqures et la corrosion superficielle. Il est recommandé de maintenir la rugosité de surface (R_a) à une valeur inférieure à $0,05 \mu\text{m} \pm 0,01 \mu\text{m}$ par polissage de précision. Ce procédé permet de réduire le taux de piqures d'environ $30 \% \pm 5 \%$, réduisant ainsi efficacement la rétention de milieux corrosifs au niveau des défauts de surface et les réactions électrochimiques locales. De plus, le nettoyage par ultrasons (fréquence $40 \text{ kHz} \pm 1 \text{ kHz}$) permet d'éliminer les contaminants de surface (teneur $< 0,1 \% \pm 0,02 \%$), tels que la graisse, la poussière ou les couches d'oxyde, afin d'améliorer encore l'intégrité de la surface. Les expériences montrent que la perte de poids des échantillons de WC-10Co polis à une valeur $R_a < 0,05 \mu\text{m}$ n'est que de $0,06 \text{ mg/cm}^2$ après exposition au brouillard salin ($\text{NaCl } 5 \% \pm 0,1 \%$) pendant 720 heures. $\pm 0,01 \text{ mg/cm}^2$, soit environ $20 \% \pm 3 \%$ de moins que la surface rugueuse ($R_a > 0,1 \mu\text{m}$), montrant une amélioration significative de la résistance à la corrosion.

(4) Procédé de frittage

L'optimisation du frittage affecte directement la force de liaison de l'interface WC-Co et l'uniformité de la distribution du Co. La température de frittage recommandée est de $1450^\circ\text{C} \pm 10^\circ\text{C}$, et un vide ou une atmosphère inerte (comme l'Ar) est utilisé pour réduire l'oxydation et garantir que l'écart de distribution du Co est maintenu en dessous de $0,1 \% \pm 0,02 \%$. Ce procédé permet d'obtenir une liaison métallurgique de l'interface WC-Co en contrôlant le temps de frittage (environ 60 à 90 minutes), et la force de liaison de l'interface est portée à $> 120 \text{ MPa} \pm 10 \text{ MPa}$, réduisant ainsi les microfissures et les pores à l'interface et inhibant la pénétration de milieux corrosifs. L'échantillon WC-10Co avec un processus de frittage optimisé a montré un i_{corr} inférieur ($< 10^{-6} \text{ A/cm}^2 \pm 10^{-7} \text{ A/cm}^2$) dans un environnement acide, et le taux d'expansion de la piqure de corrosion a été réduit d'environ $25 \% \pm 3 \%$, ce qui a considérablement amélioré la résistance à la corrosion du matériau.

(5) Normes d'essai

Afin d'évaluer et de vérifier avec précision la résistance à la corrosion optimisée, il est recommandé d'utiliser la méthode d'essai de corrosion électrochimique ASTM G59 pour effectuer des tests de polarisation électrochimique à une vitesse de balayage constante de $0,1 \text{ mV/s} \pm 0,01 \text{ mV/s}$ pour garantir une précision potentielle de $\pm 0,001 \text{ V}$. Cette norme mesure j_{corr} et potentiel de corrosion (E_{corr}) grâce à un système à trois électrodes (électrode de travail, électrode de référence et électrode auxiliaire), fournissant des données fiables pour la mise en œuvre de stratégies d'optimisation. Lors de l'essai, il est nécessaire de le réaliser dans un environnement de service simulé (par exemple, une solution de $0,1 \text{ MH}_2\text{SO}_4$ ou de 5% de NaCl) afin de garantir la cohérence des résultats avec les

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

conditions d'application réelles. Cette méthode permet de détecter avec précision si i_{corr} atteint la valeur cible ($10^{-6} \text{ A/cm}^2 \pm 10^{-7} \text{ A/cm}^2$), fournissant une base scientifique pour l'évaluation des performances des matériaux.

(6) Analyse complète du cas

En prenant l'échantillon WC-10Co (Cr_3C_2 0,5 % $\pm$ 0,01 %) comme exemple, le i_{corr} est tombée à $10^{-6} \text{ A/cm}^2 \pm 10^{-7} \text{ A/cm}^2$ dans une solution de 0,1M H_2SO_4 pendant 24 heures, ce qui était environ 98 % $\pm$ 1 % inférieur à celui du WC-12Co non optimisé (i_{corr} Français $\approx 5 \times 10^{-5} \text{ A/cm}^2 \pm 10^{-6} \text{ A/cm}^2$). La résistance à la corrosion a été améliorée d'environ 60 % $\pm$ 5 %, et la profondeur de la piqure de corrosion de surface a été réduite de $10 \mu\text{m} \pm 1 \mu\text{m}$ à $3 \mu\text{m} \pm 0,5 \mu\text{m}$, montrant une excellente résistance à la corrosion. Les observations au microscope électronique à balayage (MEB) ont montré que la couche de Cr_2O_3 et les grains fins travaillaient ensemble pour réduire considérablement les piqures et la corrosion uniforme. Cet échantillon WC-10Co optimisé a été utilisé avec succès dans des équipements chimiques (tels que des vannes résistantes aux acides), et sa durée de vie a été améliorée de 1,5 an $\pm$ 0,2 an à 2,5 ans $\pm$ 0,2 an, vérifiant la faisabilité de la stratégie d'optimisation.

(7) Co-optimisation de l'environnement et du processus

des conditions environnementales et des paramètres du procédé. Par exemple, dans un environnement de brouillard salin à forte concentration en Cl^- ($> 5 \% \pm 0,1 \%$), le rôle du polissage de surface et de la couche de Cr_2O_3 est particulièrement critique, ce qui peut réduire le taux de piqures à $15 \% \pm 3 \%$. Parallèlement, la combinaison d'un réglage précis de la température de frittage ($1450^\circ\text{C} \pm 10^\circ\text{C}$) et du contrôle de la teneur en Co ($8 \%-10 \% \pm 1 \%$) assure un équilibre entre stabilité de l'interface et résistance à la corrosion. Dans les applications pratiques, pour différents environnements corrosifs (tels que le brouillard salin dans les équipements marins ou les milieux acides dans l'industrie chimique), la proportion d'additifs ou l'intensité du traitement de surface peuvent être ajustées en fonction des besoins spécifiques afin d'optimiser davantage la résistance à la corrosion.

L'optimisation de la résistance à la corrosion du carbure cimenté doit être obtenue par l'optimisation de la composition (Co 8%-10% $\pm$ 1%, granulométrie $0,51 \mu\text{m} \pm 0,01 \mu\text{m}$), l'ajout de Cr_3C_2 (0,5% $\pm$ 0,01%), le traitement de surface ($R_a < 0,05 \mu\text{m} \pm 0,01 \mu\text{m}$, nettoyage par ultrasons), le processus de frittage ($1450^\circ\text{C} \pm 10^\circ\text{C}$, résistance de l'interface $> 120 \text{ MPa} \pm 10 \text{ MPa}$) et les tests standard (ASTM G59). Ces stratégies fonctionnent ensemble pour réduire i_{corr} à $10^{-6} \text{ A/cm}^2 \pm 10^{-7} \text{ A/cm}^2$ et améliorer la résistance à la corrosion de 60 % $\pm$ 5 %, répondant aux besoins d'applications exigeantes telles que les équipements chimiques et les équipements marins.

Application technique de la résistance à la corrosion du carbure cimenté

L'optimisation du comportement électrochimique améliore considérablement la résistance à la corrosion du carbure cimenté, offrant ainsi un excellent potentiel d'application dans divers environnements industriels et techniques difficiles. Le carbure cimenté optimisé prolonge efficacement la durée de vie en réduisant la densité de courant de corrosion (i_{corr}) à 10^{-6} A/cm^2

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

$\pm 10^{-7} \text{ A/cm}^2$, augmentant le potentiel de corrosion (E_{corr}) et réduire le taux de perte de poids. Ce qui suit s'appuie sur les trois principaux domaines que sont les vannes chimiques, les équipements marins et l'agroalimentaire, combinés à des cas et des données spécifiques, pour examiner en détail les performances et les avantages de la résistance à la corrosion du carbure cimenté dans les applications techniques.

(1) Application du carbure cimenté dans les vannes chimiques

Dans l'industrie chimique, les vannes sont souvent exposées à des milieux fortement acides (tels que l'acide sulfurique et l'acide chlorhydrique), ce qui exige une résistance à la corrosion extrêmement élevée des matériaux. Le carbure cimenté WC-10Co optimisé (Cr_3C_2 ajouté 0,5 % $\pm$ 0,01 %, granulométrie 0,5 μm $\pm$ 0,01 μm) présente une excellente résistance à la corrosion dans un environnement d'acide sulfurique avec un pH de $2 \pm 0,1$, et sa perte de poids n'est que de 0,06 mg/cm^2 $\pm$ 0,01 mg/cm^2 , la densité de courant de corrosion (i_{corr}) est d'environ $10^{-6} \text{ A/cm}^2 \pm 10^{-7} \text{ A/cm}^2$. Comparé au WC-10Co non optimisé ($i_{\text{corr}} \approx 10^{-5} \text{ A/cm}^2 \pm 10^{-6} \text{ A/cm}^2$, la perte de poids est de 0,12 $\text{mg/cm}^2 \pm 0,01 \text{ mg/cm}^2$), la résistance à la corrosion du matériau optimisé est améliorée d'environ 50 % $\pm$ 5 %. Cette amélioration est due à la couche de passivation Cr_2O_3 formée par Cr_3C_2 et à la distribution uniforme des grains fins, qui inhibent efficacement la dissolution du cobalt et la libération des particules de WC. Dans les applications pratiques, la durée de vie des vannes chimiques fabriquées dans ce matériau dépasse 2 ans $\pm$ 0,2 an, ce qui est nettement mieux qu'un an $\pm$ 0,1 an sans optimisation. Il est particulièrement adapté aux environnements hautement corrosifs tels que la production d'acide sulfurique, les pipelines chimiques et les réacteurs, réduisant les coûts de maintenance et améliorant l'efficacité de la production.

(2) Application du carbure cimenté dans les équipements marins

Les équipements marins (tels que les composants de forage et les corps de pompe) doivent résister durablement à la double corrosion du brouillard salin (concentration de NaCl 5 % $\pm$ 0,1 %) et de l'immersion en eau de mer. Le carbure cimenté WC-8Co optimisé (rugosité de surface $R_a < 0,05 \mu\text{m}$ $\pm$ 0,01 μm) présente une excellente résistance à la corrosion en environnement de brouillard salin, et sa perte de poids n'est que de 0,08 $\text{mg/cm}^2 \pm 0,01 \text{ mg/cm}^2$, le potentiel de corrosion (E_{corr}) a augmenté à 0,18 V $\pm$ 0,02 V (par rapport à l'électrode au calomel saturée, SCE), par rapport au WC-10Co non optimisé ($E_{\text{corr}} \approx 0,05 \text{ V} \pm 0,02 \text{ V}$, perte de poids 0,15 $\text{mg/cm}^2 \pm 0,01 \text{ mg/cm}^2$), la résistance à la corrosion est améliorée d'environ 50 % $\pm$ 5 %. La faible rugosité de surface réduit les points de défaut pour la pénétration des ions Cl^- , tandis que la teneur optimisée en Co (8 % $\pm$ 1 %) réduit l'activité électrochimique. Cette performance lui confère une excellente performance dans les composants de forage marin, avec une durée de vie de plus de 3 ans $\pm$ 0,3 an, dépassant largement les 1,5 ans $\pm$ 0,2 an des matériaux traditionnels. Par exemple, dans le forage pétrolier et gazier en eaux profondes, les trépan en WC-8Co présentent une excellente résistance à la corrosion et à l'usure, réduisant la fréquence de remplacement des composants due à la corrosion et améliorant les avantages économiques de l'ingénierie marine.

(3) Application du carbure cimenté dans la transformation des aliments

Français Les équipements de transformation des aliments doivent respecter les normes d'hygiène et

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

résister à la corrosion due aux milieux acides faibles (tels que l'acide acétique et l'acide citrique). Le carbure cémenté WC-10Co optimisé (ajout de Cr_3C_2 0,5 % $\pm$ 0,01 %) se comporte bien dans un environnement d'acide acétique avec un pH de $4 \pm 0,1$, avec une densité de courant de corrosion (i_{corr}) inférieure à $10^{-6} \text{ A/cm}^2 \pm 10^{-7} \text{ A/cm}^2$ et un taux de perte de poids de seulement $0,05 \text{ mg/cm}^2 \pm 0,01 \text{ mg/cm}^2$, bien inférieur au taux non optimisé de $0,10 \text{ mg/cm}^2 \pm 0,01 \text{ mg/cm}^2$. La formation de la couche de passivation Cr_2O_3 inhibe efficacement la formation de produits de corrosion, et sa teneur est contrôlée en dessous de $0,01 \% \pm 0,002 \%$, ce qui répond aux exigences de sécurité des matériaux en contact avec les aliments (telles que la norme GB 4806.1-2016). De plus, la finesse des grains ($0,5 \mu\text{m} \pm 0,01 \mu\text{m}$) assure la planéité de la surface et la constance de la résistance à la corrosion, de sorte que sa durée de vie dans les équipements de transformation des aliments (tels que les mélangeurs, les couteaux) dépasse $2 \text{ ans} \pm 0,2 \text{ an}$. Comparé à l'acier inoxydable traditionnel (durée de vie d'environ $1 \text{ an} \pm 0,1 \text{ an}$), il présente une durabilité et une sécurité hygiénique supérieures, et est particulièrement adapté à la transformation des aliments acides (tels que le vinaigre et les jus).

(4) Valeur technique de l'optimisation du comportement électrochimique

Les cas ci-dessus montrent que l'optimisation du comportement électrochimique (comme la réduction de i_{corr} et l'augmentation de E_{corr}) est au cœur de l'amélioration de la résistance à la corrosion du carbure cémenté. Grâce à l'optimisation de la composition (Co 8%-10% $\pm$ 1%), à l'ajout de Cr_3C_2 (0,5% $\pm$ 0,01%), au polissage de surface ($R_a < 0,05 \mu\text{m} \pm 0,01 \mu\text{m}$) et à l'amélioration du processus de frittage ($1450^\circ\text{C} \pm 10^\circ\text{C}$), le taux de perte de poids et le taux de corrosion du carbure cémenté sont considérablement réduits, et la résistance à la corrosion est améliorée de 50%-60% $\pm$ 5%. Cette amélioration des performances prolonge non seulement la durée de vie du matériau dans un environnement corrosif (comme les vannes chimiques $> 2 \text{ ans} \pm 0,2 \text{ an}$, les équipements marins $> 3 \text{ ans} \pm 0,3 \text{ an}$), mais réduit également la fréquence de maintenance et les coûts de remplacement. Par exemple, dans les vannes chimiques, le coût de maintenance annuel du matériau optimisé est réduit d'environ 30 % $\pm$ 5 %, et dans le forage marin, le cycle de remplacement des composants est prolongé de 50 % $\pm$ 5 %, ce qui reflète ses avantages économiques dans les applications d'ingénierie.

(5) Adaptabilité environnementale et expansion des applications

Il est adaptable à une plus large gamme d'environnements corrosifs. Par exemple, dans l'environnement des champs pétroliers et gaziers contenant des sulfures (H_2S), l'échantillon WC-10Co avec l'ajout de Cr_3C_2 est protégé par la couche de Cr_2O_3 , et sa résistance à la corrosion par les sulfures est améliorée d'environ 40 % $\pm$ 5 %, ce qui convient aux équipements de traitement des gaz acides (durée de vie $> 2,5 \text{ ans} \pm 0,2 \text{ an}$). De plus, dans l'environnement de brouillard salin à haute température ($50^\circ\text{C} \pm 2^\circ\text{C}$, NaCl 5 % $\pm$ 0,1 %), l'effet synergique du polissage de surface et des grains fins maintient le taux de perte de poids à $0,09 \text{ mg/cm}^2 \pm 0,01 \text{ mg/cm}^2$, répondant aux besoins des applications dans des conditions marines extrêmes (telles que les pipelines en haute mer). Ces applications étendues confirment encore la polyvalence de la stratégie d'optimisation.

Étude de cas complète et perspectives d'avenir

Prenons l'exemple du WC-10Co (Cr_3C_2 0,5 % $\pm$ 0,01 %) : ses performances dans divers

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

environnements corrosifs sont supérieures à celles des matériaux traditionnels. Dans 0,1 MH_2SO_4 , l'indice de corrosion (i_{corr}) chute à $10^{-6} \text{A/cm}^2 \pm 10^{-7} \text{A/cm}^2$, et la résistance à la corrosion est améliorée de $60 \% \pm 5 \%$; dans un brouillard salin à 5 % de NaCl, l'indice de corrosion (E_{corr}) La tension de service atteint $0,18 \text{ V} \pm 0,02 \text{ V}$, et la durée de vie est prolongée à $3 \text{ ans} \pm 0,3 \text{ an}$; et dans un environnement acide acétique, la teneur en produits de corrosion est inférieure à $0,01 \% \pm 0,002 \%$, ce qui répond aux normes d'hygiène. Ces résultats montrent que l'optimisation du comportement électrochimique non seulement prolonge la durée de vie du carbure cimenté, mais lui offre également de larges perspectives d'application dans les domaines de la chimie, de la marine et de l'agroalimentaire. À l'avenir, l'introduction de nouveaux additifs (tels que le VC et le TaC) ou le développement d'une technologie de revêtement multicouche permettra d'améliorer encore ses performances dans les environnements ultra-corrosifs (tels que le brouillard salin acide à haute température) afin de répondre à des besoins d'ingénierie plus complexes.

Grâce à l'optimisation de son comportement électrochimique, le carbure cimenté présente une excellente résistance à la corrosion dans les vannes chimiques, les équipements marins et l'industrie agroalimentaire. Le taux de perte de poids des formules optimisées telles que WC-10Co et WC-8Co ($0,05\text{-}0,08 \text{ mg/cm}^2 \pm 0,01 \text{ mg/cm}^2$) est de $0,05 \text{ à } 0,08 \text{ mg/cm}^2 \cdot i_{\text{corr}} (< 10^{-6} \text{ A/cm}^2 \pm 10^{-7} \text{ A/cm}^2)$, et $E_{\text{corr}} (> 0,18 \text{ V} \pm 0,02 \text{ V})$ ont été considérablement améliorés, et la durée de vie a dépassé respectivement $2 \text{ à } 3 \text{ ans} \pm 0,2 \text{ à } 0,3 \text{ an}$. Ces cas d'application prouvent pleinement que l'optimisation du comportement électrochimique est une stratégie clé pour améliorer la résistance à la corrosion du carbure cimenté et élargir le champ des applications techniques.

8.1.2 Environnement acide/brouillard salin du carbure cimenté

8.1.2.1 Principe et aperçu technique

Français Les environnements acides ($\text{pH} < 3 \pm 0,1$) et de brouillard salin (concentration de NaCl 5 % $\pm 0,1 \%$, selon la norme ISO 9227) imposent des exigences extrêmement élevées à la résistance à la corrosion du carbure cimenté, avec un taux de perte de poids cible de $0,1 \text{ mg/cm}^2 \pm 0,01 \text{ mg/cm}^2$ ou moins pour assurer la stabilité à long terme du matériau dans ces conditions difficiles. Les ions H^+ dans l'environnement acide accélèrent considérablement la dissolution de la phase de liaison cobalt (Co), avec un taux de dissolution d'environ $10^{-6} \text{ g/cm}^2 \cdot \text{h} \pm 10^{-7} \text{ g/cm}^2 \cdot \text{h}$, ce qui entraîne la formation de piqûres de corrosion jusqu'à $110 \mu\text{m} \pm 0,1 \mu\text{m}$ de profondeur sur la surface. Français Ce processus de corrosion est principalement provoqué par des réactions électrochimiques ($\text{Co} \rightarrow \text{Co}^{2+} + 2\text{e}^-$), et H^+ agit comme un catalyseur pour améliorer encore la dissolution anodique, en particulier dans les acides forts (tels que 0,1 MH_2SO_4), où la vitesse de corrosion peut augmenter de façon exponentielle avec la diminution du pH. De plus, les particules de WC (taille $0,52 \mu\text{m} \pm 0,01 \mu\text{m}$) tombent en raison de la perte du support de phase de liaison, ce qui aggrave la dégradation du matériau. Dans un environnement de brouillard salin, les ions Cl^- , en tant qu'anions fortement pénétrants, induisent une corrosion par piqûres. Le diamètre de la piqûre de corrosion est également d'environ $110 \mu\text{m} \pm 0,1 \mu\text{m}$. Le fond de la piqûre s'accompagne souvent du pelage des particules de WC et du dépôt de produits d'oxydation (tels que WO_3). Ce phénomène de piqûres est

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

particulièrement évident dans des conditions d'humidité élevée, car le Cl^- peut détruire le film de passivation à la surface du cobalt (comme $\text{Co}(\text{OH})_2$), formant des micro-batteries électrochimiques locales et accélérant l'expansion de la corrosion. L'optimisation de la résistance à la corrosion nécessite d'ajuster la composition du matériau et le traitement de surface, en se concentrant sur l'inhibition de l'activité électrochimique du Co et en améliorant la stabilité et la capacité anti-décapage de l'interface WC-Co.

L'essai au brouillard salin est réalisé conformément à la norme ISO 9227:2017 dans une chambre de brouillard salin à $35^\circ\text{C} \pm 1^\circ\text{C}$ et une humidité relative $> 95\% \pm 1\%$. La taille de l'échantillon est de $50 \times 50 \times 5 \text{ mm} \pm 0,1 \text{ mm}$ afin de garantir une exposition uniforme de la surface. Le volume de pulvérisation est contrôlé à $12 \text{ ml/h} \pm 0,1 \text{ ml/h}$ pour simuler les conditions corrosives des atmosphères marines ou industrielles. Le cycle d'essai est généralement de $1\,000 \text{ heures} \pm 100 \text{ heures}$, selon les exigences d'évaluation de la résistance à la corrosion du matériau. Par exemple, la perte de poids du carbure cimenté WC-10Co non optimisé lors de l'essai au brouillard salin de $1\,000 \text{ heures}$ a atteint $0,09 \text{ mg/cm}^2 \pm 0,01 \text{ mg/cm}^2$, avec des signes évidents de piqûres et de corrosion uniforme en surface. Français En ajoutant Cr_3C_2 ($0,5\% \pm 0,01\%$), le taux de perte de poids est réduit à $0,06 \text{ mg/cm}^2 \pm 0,01 \text{ mg/cm}^2$ et le taux de piqûres a diminué d'environ $40\% \pm 5\%$, ce qui indique que l'additif a un effet significatif dans l'inhibition de la corrosion localisée. Cette section discute en détail de la résistance à la corrosion du carbure cimenté dans les environnements acides et de brouillard salin et de son potentiel d'application technique à travers une analyse approfondie des mécanismes de corrosion, des méthodes d'essai, des stratégies d'optimisation et des cas réels.

8.1.2.2 Mécanisme et analyse du carbure cimenté en environnement acide/brouillard salin

La résistance à la corrosion du carbure cimenté dans des environnements corrosifs tels que l'acide ($\text{pH} < 3 \pm 0,1$) et le brouillard salin ($\text{NaCl } 5\% \pm 0,1\%$) détermine directement sa durée de vie réelle dans les domaines chimique, marin et industriel. Le mécanisme de corrosion implique la dissolution électrochimique de la phase de liaison cobalt (Co), la stabilité des particules de carbure de tungstène (WC) et l'influence des conditions environnementales sur la surface du matériau. À partir du comportement à la corrosion dans les environnements acides et au brouillard salin, combiné à des réactions chimiques, des analyses microscopiques et des calculs de perte de poids, le mécanisme de corrosion du carbure cimenté est exploré en profondeur, et l'effet régulateur des stratégies d'optimisation (telles que l'ajout de Cr_3C_2 et le contrôle de la granulométrie) sur le comportement à la corrosion est analysé.

(1) Mécanisme de corrosion en milieu acide

En milieu acide ($\text{pH} < 3 \pm 0,1$), le cobalt (Co) de la phase liante subit une réaction de dissolution électrochimique importante dont les principales réactions sont :



Français La vitesse de dissolution de cette réaction est d'environ $10^{-6} \text{ g/cm}^2 \cdot \text{h} \pm 10^{-7} \text{ g/cm}^2 \cdot \text{h}$, ce qui indique que le Co a une activité chimique élevée dans les milieux acides (tels que l'acide

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

sulfurique et l'acide chlorhydrique). En revanche, le carbure de tungstène (WC), en tant que phase dure, a une stabilité chimique extrêmement élevée et une vitesse de dissolution très faible ($< 10^{-8} \text{ g/cm}^2 \cdot \text{h} \pm 10^{-9} \text{ g/cm}^2 \cdot \text{h}$), et participe à peine à la réaction. Cependant, la dissolution préférentielle du Co conduit à un affaiblissement de la force de liaison interfaciale entre lui et les particules de WC, et les particules de WC se détachent progressivement, avec un taux de décollement de $0,1 \% \pm 0,02 \%$. Ce phénomène de décollement provoque des défauts microscopiques à la surface du matériau, accélérant le processus de corrosion ultérieur. Le faible pH de l'environnement acide peut également déclencher des effets électrochimiques locaux de microbatterie, aggravant encore la dissolution du Co et le décollement des particules de WC. En particulier lorsque la concentration en H^+ est élevée (par exemple $0,1 \text{ MH}_2\text{SO}_4$), la vitesse d'expansion de la piqûre de corrosion peut atteindre $0,2 \mu\text{m/h} \pm 0,02 \mu\text{m/h}$.

(2) Mécanisme de corrosion dans un environnement de brouillard salin

Français Dans un environnement de brouillard salin (concentration de NaCl $5 \% \pm 0,1 \%$), les dommages causés par les ions chlorure (Cl^-) à la surface du carbure cémenté sont le principal facteur de corrosion. La couche d'oxyde naturelle à la surface du Co (principalement $\text{Co}(\text{OH})_2$ ou CoO , d'une épaisseur d'environ $5 \text{ nm} \pm 1 \text{ nm}$) est détruite par les ions Cl^- . Cl^- détruit les propriétés protectrices de la couche d'oxyde par adsorption et pénétration, ce qui entraîne des piqûres. La profondeur initiale des piqûres est généralement de $5 \mu\text{m} \pm 0,5 \mu\text{m}$, et le fond de la piqûre est centré sur la dissolution du Co et s'étend progressivement jusqu'à la zone exposée des particules de WC. La formation de piqûres est liée à l'acidification locale causée par Cl^- , et la valeur du pH dans la piqûre peut chuter à 2-3, accélérant encore la dissolution du Co. L'humidité élevée ($\geq 95\% \text{ HR}$) et la température ($35^\circ\text{C} \pm 2^\circ\text{C}$) dans l'environnement de brouillard salin favorisent également la réaction électrochimique, ce qui rend le taux de corrosion $30\% \pm 5\%$ plus élevé que celui d'un environnement sec.

(3) Calcul de la perte de poids et évaluation de la corrosion

Le degré de corrosion du carbure cémenté dans les environnements acides ou de brouillard salin est généralement quantifié par le taux de perte de poids, qui est calculé comme suit :

$$\Delta W = \frac{m_0 - m_t}{A}$$

Français Où ΔW est le taux de perte de poids (mg/cm^2), m_0 est la masse avant l'essai (mg , précision $\pm 0,01 \text{ mg}$), m_t est la masse après l'essai (mg , précision $\pm 0,01 \text{ mg}$) et A est la surface de l'échantillon (cm^2 , précision $\pm 0,1 \text{ cm}^2$). Le taux de perte de poids du carbure cémenté optimisé (tel que WC-10Co avec Cr_3C_2 ajouté) après l'essai au brouillard salin (ISO 9227 NSS, 720 h) est contrôlé à $0,1 \text{ mg/cm}^2 \pm 0,01 \text{ mg/cm}^2$ ou moins, ce qui indique que sa résistance à la corrosion est significativement meilleure que celle des matériaux non optimisés (taux de perte de poids $0,15 \text{ mg/cm}^2 \pm 0,01 \text{ mg/cm}^2$). La diminution du taux de perte de poids reflète la réduction des produits de corrosion à la surface du matériau et la suppression de la profondeur des piqûres.

(4) Analyse de la stratégie et du mécanisme d'optimisation

Pour améliorer la résistance à la corrosion du carbure cémenté dans les environnements

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

acides/brouillard salin, l'ajout de Cr_3C_2 ($0,5 \% \pm 0,01 \%$) et le contrôle de la granulométrie ($0,5 \mu\text{m} \pm 0,01 \mu\text{m}$) sont deux stratégies efficaces. L'ajout de Cr_3C_2 réagit avec l'oxygène lors du frittage à haute température pour former une couche de passivation Cr_2O_3 d'une épaisseur d'environ $10 \text{ nm} \pm 1 \text{ nm}$, qui présente une excellente résistance à la pénétration de Cl^- et réduit significativement le taux de piqûres d'environ $40 \% \pm 5 \%$. La formation de la couche Cr_2O_3 réduit les sites actifs de la réaction électrochimique en bloquant le contact direct entre les ions Cl^- et les ions H^+ et Co, inhibant ainsi l'expansion de la corrosion par piqûres. L'optimisation de la granulométrie ($0,5 \mu\text{m} \pm 0,01 \mu\text{m}$) augmente la densité des joints de grains et réduit la surface d'exposition du Co ($< 10 \% \pm 1 \%$), ce qui rend le chemin de pénétration du milieu corrosif plus dispersé et réduit le taux de perte de poids d'environ $20 \% \pm 5 \%$. Ceci montre que la distribution uniforme des grains fins réduit efficacement la sensibilité à la corrosion locale.

(5) Analyse et vérification microscopiques

par microscopie électronique à balayage (MEB, résolution $< 0,1 \mu\text{m} \pm 0,01 \mu\text{m}$) ont montré que les piqûres étaient centrées sur la dissolution du Co, que les particules de WC étaient exposées dans les piqûres et que la taille des particules était d'environ $0,51 \mu\text{m} \pm 0,01 \mu\text{m}$, ce qui était cohérent avec la taille initiale des grains, indiquant que la corrosion se produisait principalement à l'interface WC-Co. La spectroscopie dispersive en énergie (EDS) a en outre confirmé que la teneur en Cr dans la couche de passivation Cr_2O_3 était d'environ $5 \% \pm 0,5 \%$, et que sa distribution était uniformément répartie sur la surface du matériau, isolant efficacement le milieu corrosif. Les données EDS ont également montré que la teneur en Co dans la zone de piqûres était significativement réduite (de 10% à $2 \% \pm 0,5 \%$), vérifiant le mécanisme de dissolution préférentielle du Co. Dans un environnement de brouillard salin, la profondeur de piqûre de l'échantillon WC-10Co avec Cr_3C_2 ajouté a diminué de $5 \mu\text{m} \pm 0,5 \mu\text{m}$ à $3 \mu\text{m} \pm 0,3 \mu\text{m}$, indiquant que la stratégie d'optimisation a considérablement amélioré la résistance à la corrosion du matériau.

(6) Conditions environnementales et dynamique de la corrosion

Français La dynamique de la corrosion dans les environnements acides est principalement affectée par la concentration en H^+ et la température. Lorsque la température s'élève à $50^\circ\text{C} \pm 2^\circ\text{C}$, le taux de dissolution du Co peut augmenter de $15 \% \pm 2 \%$, exacerbant la perte de particules de WC. La concentration en Cl^- ($> 5 \% \pm 0,1 \%$) et l'humidité ($> 95 \% \text{ HR}$) dans l'environnement de brouillard salin amplifieront encore l'effet de piqûres, et la densité des piqûres de corrosion peut atteindre $10\text{-}15 / \text{mm}^2$. Après une exposition à long terme (par exemple 720 h), un pelage à grande échelle s'est produit sur la surface de l'échantillon WC-10Co non optimisé, tandis que l'échantillon optimisé n'a montré que de légères piqûres, indiquant que l'effet synergique de la couche de Cr_2O_3 et des grains fins a joué un rôle protecteur clé dans la corrosion dynamique.

(7) Analyse de cas complète

Français Prenons l'échantillon WC-10Co comme exemple, le taux de perte de poids de l'échantillon non optimisé dans $0,1 \text{ M H}_2\text{SO}_4$ pendant 24 h est de $0,12 \text{ mg/cm}^2 \pm 0,01 \text{ mg/cm}^2$, et la profondeur de piqûre atteint $6 \mu\text{m} \pm 0,5 \mu\text{m}$. Pour l'échantillon optimisé avec ajout de Cr_3C_2 ($0,5 \% \pm 0,01 \%$) et granulométrie contrôlée ($0,5 \mu\text{m} \pm 0,01 \mu\text{m}$), le taux de perte de poids est tombé à $0,06 \text{ mg/cm}^2$

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

$\pm 0,01 \text{ mg/cm}^2$, la profondeur de piqure n'est que de $3 \mu\text{m} \pm 0,3 \mu\text{m}$, et la résistance à la corrosion est améliorée d'environ $50 \% \pm 5 \%$. Dans un environnement de brouillard salin (ISO 9227 NSS, 720 h), le taux de perte de poids de l'échantillon optimisé est de $0,15 \text{ mg/cm}^2$ à $\pm 0,01 \text{ mg/cm}^2$ jusqu'à $0,08 \text{ mg/cm}^2 \pm 0,01 \text{ mg/cm}^2$ et le taux de piqures a diminué de $40 \% \pm 5 \%$, ce qui a pleinement vérifié l'effet de la stratégie d'optimisation.

(8) Importance de l'application

Français du carbure cimenté dans un environnement acide/brouillard salin révèle que la dissolution du Co et le déstage du WC sont les principaux modes de défaillance, tandis que l'introduction d'une couche de passivation Cr_2O_3 et de grains fins inhibe efficacement ces processus. Le taux de perte de poids ($\Delta W < 0,1 \text{ mg/cm}^2 \pm 0,01 \text{ mg/cm}^2$) et la réduction de la profondeur des piqures offrent une garantie fiable pour l'application du carbure cimenté dans les vannes chimiques (résistance aux acides) et les équipements marins (résistance au brouillard salin). Grâce à l'analyse microscopique du MEB et de l'EDS, combinée aux tests standard ISO 9227, la durée de vie du carbure cimenté optimisé en environnement corrosif peut être prolongée de 50% à $60 \% \pm 5 \%$, fournissant un support théorique solide pour les applications d'ingénierie.

8.1.2.3 Analyse des facteurs affectant la corrosion du carbure cimenté dans les environnements acides et de brouillard salin

La résistance à la corrosion du carbure cimenté en milieu acide ($\text{pH} < 3 \pm 0,1$) et en brouillard salin ($\text{NaCl } 5 \% \pm 0,1 \%$) est influencée par divers facteurs, notamment les propriétés intrinsèques du matériau (teneur en Co, ajout de Cr_3C_2 , granulométrie, état de surface) et les conditions environnementales externes (pH , concentration en Cl^-). Ces facteurs influent directement sur la perte de poids, la profondeur des piqures et la résistance globale à la corrosion du carbure cimenté en modifiant l'activité de la réaction électrochimique, la force de liaison interfaciale et le comportement de pénétration du milieu corrosif. À partir des facteurs clés mentionnés ci-dessus, combinés à des données expérimentales, des analyses microscopiques et des cas réels, nous présentons ci-après en détail leur influence sur le comportement à la corrosion du carbure cimenté et son mécanisme.

(1) Effet de la teneur en Co

Le cobalt (Co) de la phase de liaison est le composant le plus sensible du carbure cimenté, et sa teneur affecte significativement la résistance à la corrosion du matériau. Lorsque la teneur en Co est de $10 \% \pm 1 \%$, le taux de perte de poids en environnement acide ou en brouillard salin est d'environ $0,09 \text{ mg/cm}^2 \pm 0,01 \text{ mg/cm}^2$, ce qui montre une certaine résistance à la corrosion. Cependant, lorsque la teneur en Co augmente à $12 \% \pm 1 \%$, le taux de perte de poids augmente d'environ $30 \% \pm 5 \%$, atteignant $0,12 \text{ mg/cm}^2 \pm 0,01 \text{ mg/cm}^2$. Ce changement est principalement dû à l'augmentation de la zone d'exposition au Co, ce qui entraîne une augmentation de la zone de contact avec le milieu corrosif (tel que H^+ ou Cl^-), accélérant la réaction de dissolution électrochimique ($\text{Co} \rightarrow \text{Co}^{2+} + 2\text{e}^-$). La teneur élevée en Co réduit également la capacité de passivation du matériau, le rendant plus sensible à la corrosion uniforme et aux piqures dans les environnements acides (pH

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

$< 2 \pm 0,1$) ou les environnements de brouillard salin, affectant considérablement les performances de service à long terme du matériau.

(2) Effet de l'ajout de Cr_3C_2

L'ajout de carbure de chrome (Cr_3C_2) est une stratégie efficace pour améliorer la résistance à la corrosion du carbure cimenté. Des études ont montré que lorsque la teneur en Cr_3C_2 est de $0,5 \% \pm 0,01 \%$, le taux de perte de poids est réduit d'environ $40 \% \pm 5 \%$, passant de $0,10 \text{ mg/cm}^2$ à $\pm 0,01 \text{ mg/cm}^2$ pour atteindre $0,06 \text{ mg/cm}^2 \pm 0,01 \text{ mg/cm}^2$. Cet effet est dû à la couche de passivation Cr_2O_3 formée par Cr_3C_2 lors du frittage. L'épaisseur est d'environ $10 \text{ nm} \pm 1 \text{ nm}$, ce qui peut bloquer efficacement la pénétration de H^+ et Cl^- et inhiber la dissolution de Co. Cependant, lorsque la teneur en Cr_3C_2 dépasse $1 \% \pm 0,01 \%$, la proportion de phases cassantes (telles que la phase η) dans le matériau augmente d'environ $10 \% \pm 2 \%$, ce qui entraîne une diminution de la ténacité à la rupture (K_{Ic}) d'environ 8% à $12 \% \pm 2 \%$. La formation de phases cassantes non seulement affaiblit les propriétés mécaniques, mais peut également induire des microfissures sous l'action de milieux corrosifs et augmenter la sensibilité locale à la corrosion. Par conséquent, la quantité d'ajout doit être strictement contrôlée.

(3) Effet de la granulométrie

La granulométrie du WC a un effet significatif sur la résistance à la corrosion du carbure cimenté en affectant la densité des joints de grains et les caractéristiques de l'interface. Lorsque la granulométrie est de $0,51 \mu\text{m} \pm 0,01 \mu\text{m}$, le nombre de joints de grains est important, le chemin de pénétration du milieu corrosif est dispersé et la profondeur de piqûre est faible ($< 5 \mu\text{m} \pm 0,5 \mu\text{m}$), ce qui montre une bonne résistance à la corrosion. Les grains fins uniformisent également la distribution du Co et réduisent la concentration de corrosion locale. Cependant, lorsque la granulométrie augmente à $2 \mu\text{m} \pm 0,01 \mu\text{m}$, la densité des joints de grains diminue et la corrosion se concentre sur une zone d'interface plus petite, ce qui entraîne une augmentation de la profondeur de piqûre d'environ $25 \% \pm 5 \%$ à $6-7 \mu\text{m} \pm 0,5 \mu\text{m}$. La taille plus grande des grains rend l'interface WC-Co plus facilement exposée au milieu corrosif, en particulier dans un environnement acide, où la pénétration de H^+ le long de la limite des grains exacerbe la dissolution du Co et la perte de particules de WC.

(4) Impact des conditions environnementales

Les conditions environnementales externes sont des facteurs importants affectant le comportement à la corrosion du carbure cimenté. En milieu acide, lorsque le pH descend en dessous de $2 \pm 0,1$, la concentration en ions H^+ augmente significativement, la vitesse de dissolution du Co s'accélère et le taux de perte de poids augmente d'environ $50 \% \pm 5 \%$, passant de $0,08 \text{ mg/cm}^2$ à $\pm 0,01 \text{ mg/cm}^2$ jusqu'à $0,12 \text{ mg/cm}^2 \pm 0,01 \text{ mg/cm}^2$. De faibles valeurs de pH peuvent également provoquer une dissolution à l'état de traces de WC ($\text{WC} + 5\text{H}_2\text{O} \rightarrow \text{WO}_3 + \text{CO}_2 + 10\text{H}^+ + 10\text{e}^-$), affaiblissant encore davantage la force de liaison interfaciale. Dans un environnement de brouillard salin, lorsque la concentration en NaCl dépasse $5 \% \pm 0,1 \%$, la forte pénétration des ions Cl^- détruit le film de passivation à la surface du Co, le taux de piqûres augmente d'environ $30 \% \pm 5 \%$ et la densité de piqûres peut atteindre 15 à $20 / \text{mm}^2$. Les ions Cl^- attaquent préférentiellement l'interface WC-Co

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

par adsorption et diffusion, formant des piqûres profondes, ce qui réduit considérablement la résistance à la corrosion du matériau. De plus, une augmentation de la température (par exemple $50\text{ }^{\circ}\text{C} \pm 2\text{ }^{\circ}\text{C}$) augmente le taux de corrosion de $10\text{ à }15\% \pm 2\%$, aggravant encore la défaillance par corrosion.

(5) Influence des conditions de surface

La rugosité de surface (R_a) affecte directement la résistance à la corrosion du carbure cimenté en modifiant les caractéristiques de contact entre le matériau et le milieu corrosif. Lorsque la rugosité de surface est contrôlée à $R_a < 0,05\text{ }\mu\text{m} \pm 0,01\text{ }\mu\text{m}$, la surface est lisse, les défauts (tels que les micro-rayures et les piqûres) sont réduits, la perte de poids est faible et la résistance à la corrosion est bonne. Cependant, lorsque R_a dépasse $0,1\text{ }\mu\text{m} \pm 0,01\text{ }\mu\text{m}$, les défauts de surface augmentent et le milieu corrosif est facilement retenu dans ces zones, formant des micro-batteries électrochimiques locales, ce qui entraîne une augmentation du taux de piqûres d'environ $20\% \pm 5\%$. Les surfaces très rugueuses peuvent également induire une concentration de contraintes, en particulier dans les tests de cycle de brouillard salin, le taux d'expansion des piqûres est accéléré et la profondeur augmente de $4\text{ }\mu\text{m} \pm 0,5\text{ }\mu\text{m}$ à $5\text{--}6\text{ }\mu\text{m} \pm 0,5\text{ }\mu\text{m}$, ce qui affecte sérieusement la durée de vie du matériau.

(6) Interactions entre les facteurs

Français Les facteurs ci-dessus n'agissent pas indépendamment, mais affectent ensemble le comportement à la corrosion du carbure cimenté par le biais d'interactions complexes. Par exemple, lorsqu'une teneur élevée en Co ($> 12\% \pm 1\%$) est combinée à une surface rugueuse ($R_a > 0,1\text{ }\mu\text{m} \pm 0,01\text{ }\mu\text{m}$), le taux de perte de poids peut atteindre $0,15\text{ mg/cm}^2 \pm 0,01\text{ mg/cm}^2$, la profondeur de piqûre augmente à $8\text{ }\mu\text{m} \pm 0,5\text{ }\mu\text{m}$, dépassant de loin l'influence d'un seul facteur. L'ajout de Cr_3C_2 ($0,5\% \pm 0,01\%$) peut compenser partiellement les effets néfastes d'une teneur élevée en Co, mais dans un environnement fortement acide avec un $\text{pH} < 2 \pm 0,1$, l'effet protecteur de la couche de Cr_2O_3 peut être affaibli par la corrosion H^+ . De plus, l'effet de couplage entre la taille des grains et les conditions environnementales est significatif. Les grains fins ($0,51\text{ }\mu\text{m} \pm 0,01\text{ }\mu\text{m}$) présentent une excellente résistance à la corrosion à de faibles concentrations de Cl^- ($< 5\% \pm 0,1\%$), mais la piqûre est encore difficile à inhiber complètement dans un brouillard salin à forte concentration, ce qui indique la limitation des conditions environnementales sur la protection des joints de grains.

(7) Analyse de cas complète

Français Prenons l'exemple d'échantillons de WC-12Co et WC-10Co ($\text{Cr}_3\text{C}_2\text{ }0,5\% \pm 0,01\%$), après exposition à une solution de HCl à $\text{pH } 1 \pm 0,1$ pendant 24 heures, le taux de perte de poids du WC-12Co est de $0,12\text{ mg/cm}^2 \pm 0,01\text{ mg/cm}^2$, la profondeur de piqûres est de $6\text{ }\mu\text{m} \pm 0,5\text{ }\mu\text{m}$ et des caractéristiques de piqûres évidentes à la surface, indiquant que les effets doubles d'une teneur élevée en Co et d'un environnement fortement acide aggravent la corrosion. Le taux de perte de poids du WC-10Co ($\text{Cr}_3\text{C}_2\text{ }0,5\% \pm 0,01\%$) n'est que de $0,06\text{ mg/cm}^2 \pm 0,01\text{ mg/cm}^2$, la profondeur des piqûres est de $3\text{ }\mu\text{m} \pm 0,3\text{ }\mu\text{m}$ et la résistance à la corrosion est améliorée d'environ $50\% \pm 5\%$. La spectroscopie dispersive en énergie (EDS) montre que la teneur en Cr dans la couche Cr_2O_3 est d'environ $5\% \pm 0,5\%$, ce qui isole efficacement le milieu corrosif et inhibe la dissolution du Co et

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

l'expansion des piqûres. Dans un environnement de brouillard salin ($\text{NaCl } 5\% \pm 0,1\%$, ISO 9227 NSS, 720 h), le taux de perte de poids du WC-12Co atteint $0,15 \text{ mg/cm}^2 \pm 0,01 \text{ mg/cm}^2$, tandis que le WC-10Co optimisé n'est que de $0,08 \text{ mg/cm}^2 \pm 0,01 \text{ mg/cm}^2$, vérifiant davantage l'effet protecteur du Cr_3C_2 et des grains fins.

(8) Dynamique de la corrosion et importance de l'application

L'analyse dynamique de la corrosion montre que la vitesse de dissolution du Co en milieu acide augmente linéairement avec le temps, tandis que la vitesse d'expansion des piqûres en brouillard salin est rapide au début ($< 96 \text{ h}$), puis ralentit légèrement en raison de l'accumulation des produits de corrosion. Le carbure cimenté optimisé (tel que le WC-10Co additionné de Cr_3C_2) conserve une faible perte de poids et une faible profondeur de piqûre après une exposition prolongée (720 h), ce qui témoigne de sa stabilité en milieu de corrosion dynamique. Ces caractéristiques lui permettent d'atteindre une durée de vie de $2 \text{ ans} \pm 0,2 \text{ an}$ en milieu acide (comme les vannes chimiques) et de plus de $3 \text{ ans} \pm 0,3 \text{ an}$ en brouillard salin (comme les équipements marins). L'analyse systématique des facteurs d'influence permet de fournir des orientations scientifiques pour l'application du carbure cimenté dans les environnements difficiles.

La résistance du carbure cimenté en milieu acide et en brouillard salin est influencée par la teneur en Co, l'ajout de Cr_3C_2 , la granulométrie, les conditions environnementales et l'état de surface. Une teneur élevée en Co, des grains grossiers, une rugosité élevée et un environnement fortement corrosif ($\text{pH} < 2 \pm 0,1$, $\text{NaCl} > 5\% \pm 0,1\%$) aggravent la corrosion, tandis qu'une quantité appropriée de Cr_3C_2 et de grains fins améliore significativement la résistance à la corrosion. Des études de cas complètes montrent que le taux de perte de poids du carbure cimenté optimisé est réduit de $40\% \pm 5\%$, et la profondeur des piqûres est réduite de $40\% \pm 5\%$, offrant une garantie fiable pour les applications dans les domaines chimique, maritime et autres.

8.1.2.4 Stratégie d'optimisation des effets de corrosion des environnements acides et de brouillard salin sur le carbure cimenté

cm^2 en milieu acide ($\text{pH} < 3 \pm 0,1$) et brouillard salin ($\text{NaCl } 5\% \pm 0,1\%$) $\pm 0,01 \text{ mg/cm}^2$, il est nécessaire d'améliorer systématiquement sa résistance à la corrosion par une optimisation complète de la composition du matériau, des additifs, du traitement de surface, du procédé de frittage et des spécifications d'essai. Ces mesures d'optimisation visent à réduire les chemins de corrosion, améliorer la protection de surface, Améliorer la densité des matériaux et garantir la fiabilité et la répétabilité des résultats d'essai. À partir des aspects clés mentionnés ci-dessus, combinés aux données expérimentales, aux paramètres de procédé et aux cas d'application réels, les paragraphes suivants détaillent la stratégie d'optimisation et son rôle dans le contrôle du comportement à la corrosion.

(1) Optimisation des ingrédients

En contrôlant précisément la composition chimique du carbure cimenté, l'érosion de la phase de liaison par les milieux corrosifs peut être efficacement réduite. Il est recommandé de contrôler la

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

teneur en Co dans une plage de 8 % à 10 % $\pm$ 1 %, tout en maintenant la granulométrie du WC à $0,51 \mu\text{m} \pm 0,01 \mu\text{m}$. Cette stratégie réduit les possibilités de contact avec les milieux corrosifs (tels que H^+ ou Cl^-) en réduisant la teneur en Co (zone d'exposition cible $< 10 \% \pm 1 \%$), raccourcissant ainsi le chemin de corrosion. La granulométrie fine augmente la densité des joints de grains, disperse les contraintes de corrosion, uniformise la dissolution du Co et évite une concentration de corrosion localisée. En prenant le WC-10Co comme exemple, le taux de perte de poids de la composition optimisée dans un environnement acide ($\text{pH } 2 \pm 0,1$) est réduit de $0,12 \text{ mg/cm}^2$ à $\pm 0,01 \text{ mg/cm}^2$ jusqu'à $0,07 \text{ mg/cm}^2 \pm 0,01 \text{ mg/cm}^2$, indiquant que l'effet synergique de la faible teneur en Co et des grains fins améliore considérablement la résistance à la corrosion acide.

(2) Additifs

L'ajout de carbure de chrome (Cr_3C_2) est un moyen important d'améliorer la résistance à la corrosion du carbure cimenté. La quantité d'ajout recommandée est de $0,5 \% \pm 0,01 \%$. Pendant le processus de frittage à haute température, le Cr réagit avec l'oxygène pour former une couche de passivation Cr_2O_3 d'une épaisseur d'environ $10 \text{ nm} \pm 1 \text{ nm}$. Cette couche réduit significativement le taux de piqûres d'environ $40 \% \pm 5 \%$, de $0,10 \text{ mg/cm}^2$ à $0,06 \text{ mg/cm}^2 \pm 0,01 \text{ mg/cm}^2$, en bloquant la pénétration des ions Cl^- et H^+ . La perte de poids de $\pm 0,01 \text{ mg/cm}^2$ descend à $0,06 \text{ mg/cm}^2 \pm 0,01 \text{ mg/cm}^2$. La compacité de la couche de Cr_2O_3 en fait une barrière efficace, réduisant la dissolution électrochimique du Co ($\text{Co} \rightarrow \text{Co}^{2+} + 2\text{e}^-$), notamment dans les environnements de brouillard salin ($\text{NaCl } 5\% \pm 0,1\%$). La spectroscopie dispersive en énergie (EDS) montre que la teneur en Cr dans la couche de passivation est d'environ $5 \% \pm 0,5\%$, vérifiant son effet protecteur.

(3) Traitement de surface

L'optimisation de l'état de surface est essentielle pour réduire les piqûres et la corrosion superficielle. Il est recommandé de contrôler la rugosité de surface (R_a) à moins de $0,05 \mu\text{m} \pm 0,01 \mu\text{m}$ grâce à un polissage mécanique de précision. Ce procédé permet de réduire le taux de piqûres d'environ $20 \% \pm 5 \%$ et la perte de poids de $0,09 \text{ mg/cm}^2$ à $\pm 0,01 \text{ mg/cm}^2$ jusqu'à $0,07 \text{ mg/cm}^2 \pm 0,01 \text{ mg/cm}^2$. Une faible rugosité réduit les défauts de surface (tels que les microfissures et les piqûres), limite la rétention de milieux corrosifs et l'apparition de réactions électrochimiques locales. De plus, le nettoyage par ultrasons (fréquence $40 \text{ kHz} \pm 1 \text{ kHz}$) permet d'éliminer les contaminants de surface (tels que la graisse, les oxydes, dont la teneur est inférieure à $0,1 \% \pm 0,02 \%$), améliorant ainsi l'intégrité de la surface. Les expériences montrent que la profondeur de piqûre de l'échantillon WC-10Co avec un traitement de surface optimisé dans un environnement de brouillard salin (ISO 9227 NSS, 720 h) est réduite de $5 \mu\text{m} \pm 0,5 \mu\text{m}$ à $4 \mu\text{m} \pm 0,3 \mu\text{m}$, montrant une amélioration significative de la résistance à la corrosion.

(4) Procédé de frittage

L'optimisation du processus de frittage affecte directement la densité du carbure cimenté et l'uniformité de la distribution du Co. La température de frittage recommandée est de $1450^\circ\text{C} \pm 10^\circ\text{C}$, et le vide ou une atmosphère inerte (comme Ar) est utilisé pour réduire l'oxydation et garantir une densité du matériau de $99,5 \% \pm 0,1 \%$. En contrôlant le temps de frittage (60 à 90 minutes), l'écart de distribution du Co peut être obtenu en dessous de $0,1 \% \pm 0,02 \%$, améliorant ainsi la force

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

de liaison de l'interface WC-Co ($> 120 \text{ MPa} \pm 10 \text{ MPa}$). La densité élevée et la distribution uniforme du Co réduisent les pores et les microfissures, limitant ainsi la pénétration des milieux corrosifs. En prenant comme exemple le WC-10Co fritté optimisé, son taux de perte de poids dans un environnement acide ($\text{pH } 1 \pm 0,1$) est réduit de $0,11 \text{ mg/cm}^2$ à $\pm 0,01 \text{ mg/cm}^2$ jusqu'à $0,06 \text{ mg/cm}^2 \pm 0,01 \text{ mg/cm}^2$, ce qui indique que l'amélioration du processus de frittage améliore considérablement la résistance à la corrosion du matériau.

(5) Spécifications des tests

Afin d'évaluer avec précision la résistance à la corrosion optimisée, il est recommandé d'utiliser la norme ISO 9227:2017 « Essai de corrosion - Essai au brouillard salin en atmosphère artificielle », de régler le volume de pulvérisation à $12 \text{ mL/h} \pm 0,1 \text{ mL/h}$ (surface horizontale de 80 cm^2) pour garantir la répétabilité des conditions d'essai. La mesure de la masse nécessite une balance de précision avec une précision de $\pm 0,01 \text{ mg}$, la précision de mesure de la surface de l'échantillon est de $\pm 0,1 \text{ cm}^2$ et le taux de perte de poids est calculé comme suit : $\Delta W = (m_0 - m_t) / A$, où m_0 et m_t sont respectivement les masses avant et après l'essai. La durée de l'essai peut être ajustée en fonction des exigences de l'application, par exemple $2000 \text{ h} \pm 100 \text{ h}$ pour l'évaluation de la résistance à la corrosion à long terme. Cette spécification permet de contrôler avec précision si le taux de perte de poids atteint la valeur cible ($< 0,08 \text{ mg/cm}^2 \pm 0,01 \text{ mg/cm}^2$), fournissant ainsi une base scientifique pour l'optimisation des propriétés des matériaux.

(6) Analyse complète du cas

En prenant l'échantillon WC-10Co ($\text{Cr } 3 \pm 0,5 \% \pm 0,01 \%$, rugosité de surface $R_a < 0,05 \mu\text{m} \pm 0,01 \mu\text{m}$) comme exemple, dans le test au brouillard salin ISO 9227 NSS ($\text{NaCl } 5 \% \pm 0,1 \%$, $2000 \text{ h} \pm 100 \text{ h}$), son taux de perte de poids n'est que de $0,06 \text{ mg/cm}^2 \pm 0,01 \text{ mg/cm}^2$, bien inférieur à celui du WC-12Co non optimisé (perte de poids de $0,15 \text{ mg/cm}^2 \pm 0,01 \text{ mg/cm}^2$). Les observations au microscope électronique à balayage (MEB) ont montré que la profondeur de piqure de l'échantillon optimisé était de $3 \mu\text{m} \pm 0,3 \mu\text{m}$, soit environ $50 \% \pm 5 \%$ de moins que les $6 \mu\text{m} \pm 0,5 \mu\text{m}$ non optimisés. La spectroscopie dispersive en énergie (EDS) a confirmé que l'épaisseur de la couche de Cr_2O_3 était d'environ $10 \text{ nm} \pm 1 \text{ nm}$ et que la teneur en Cr était d'environ $5 \% \pm 0,5 \%$, ce qui inhibait efficacement la pénétration du Cl^- et la dissolution du Co. Cette performance lui permet de répondre aux besoins des applications marines, telles que les composants de forage en haute mer, avec une durée de vie allant jusqu'à $3 \text{ ans} \pm 0,3 \text{ an}$, ce qui est mieux que les $1,5 \text{ an} \pm 0,2 \text{ an}$ des matériaux traditionnels.

(7) Adaptabilité environnementale et synergie des processus

La stratégie d'optimisation doit prendre en compte l'effet synergétique des conditions environnementales et des paramètres du procédé. En milieu acide ($\text{pH} < 2 \pm 0,1$), l'effet protecteur de la couche de Cr_2O_3 , combiné à la finesse des grains ($0,51 \mu\text{m} \pm 0,01 \mu\text{m}$), est important. On peut contrôler le taux de perte de poids à $0,06 \text{ mg/cm}^2 \pm 0,01 \text{ mg/cm}^2$, tandis que dans le brouillard salin à haute température ($50 \text{ }^\circ\text{C} \pm 2 \text{ }^\circ\text{C}$, $\text{NaCl } 5 \% \pm 0,1 \%$), l'effet synergique du polissage de surface et de la densification par frittage (densité $> 99,5 \% \pm 0,1 \%$) réduit encore le taux de piqures.

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

à $15\% \pm 3\%$. Pour différents environnements corrosifs, la teneur en Co ou la température de frittage peuvent être ajustées en fonction des besoins réels, par exemple, dans un environnement fortement acide, le Co peut être réduit à $8\% \pm 1\%$ pour améliorer encore la résistance à la corrosion.

(8) Importance de l'application et optimisation dynamique

La perte de poids optimisée du carbure dans un environnement acide/brouillard salin ($< 0,08 \text{ mg/cm}^2 \pm 0,01 \text{ mg/cm}^2$) lui permet d'être performant dans les domaines des vannes chimiques (résistance aux acides, durée de vie $> 2 \text{ ans} \pm 0,2 \text{ ans}$), des équipements marins (résistance au brouillard salin, durée de vie $> 3 \text{ ans} \pm 0,3 \text{ ans}$). Les essais de corrosion dynamique montrent que le taux de perte de poids augmente linéairement avec le temps au début ($< 500 \text{ h}$), puis se stabilise en raison de l'accumulation de produits de corrosion (tels que $\text{Co}(\text{OH})_2$). L'échantillon optimisé conserve toujours un faible taux de perte de poids après $2000 \text{ h} \pm 100 \text{ h}$, vérifiant la résistance à la corrosion à long terme. À l'avenir, les performances pourront être encore optimisées en introduisant des revêtements multicouches ou de nouveaux additifs (tels que TaC) pour s'adapter à des environnements de corrosion plus complexes.

Français La résistance à la corrosion du carbure cémenté dans les environnements acides et de brouillard salin est optimisée par le contrôle de la teneur en Co ($8\%-10\% \pm 1\%$), l'optimisation du grain WC ($0,51 \mu\text{m} \pm 0,01 \mu\text{m}$), l'ajout de Cr_3C_2 ($0,5\% \pm 0,01\%$), le traitement de surface ($R_a < 0,05 \mu\text{m} \pm 0,01 \mu\text{m}$, nettoyage par ultrasons) et le processus de frittage ($1450^\circ\text{C} \pm 10^\circ\text{C}$, densité $> 99,5\% \pm 0,1\%$). Ces stratégies fonctionnent ensemble pour réduire le taux de perte de poids à $0,06 \text{ mg/cm}^2 \pm 0,01 \text{ mg/cm}^2$, le taux de piqûres réduit de $40\%-50\% \pm 5\%$, répondant aux exigences d'application dans les domaines marin, chimique et autres.

8.1.2.5 Applications techniques du carbure cémenté dans les environnements acides et de brouillard salin

Le carbure cémenté optimisé présente une excellente résistance à la corrosion dans des environnements difficiles tels que les environnements acides ($\text{pH} < 3 \pm 0,1$) et le brouillard salin ($\text{NaCl } 5\% \pm 0,1\%$). Il offre des solutions d'ingénierie fiables pour de nombreux secteurs industriels en réduisant la perte de poids, en inhibant la corrosion par piqûres et en prolongeant la durée de vie. Ces mesures d'optimisation comprennent l'ajustement de la composition (notamment le contrôle de la teneur en Co), l'introduction d'additifs (tels que Cr_3C_2), l'optimisation du traitement de surface et l'amélioration du procédé de frittage, ce qui confère au carbure cémenté un potentiel d'application significatif dans des secteurs tels que la marine, la chimie et la papeterie. En partant des trois principaux domaines d'application que sont les composants de forage marin, les vannes de pipelines chimiques et les équipements de fabrication de papier, et en s'appuyant sur des données spécifiques et des cas réels, nous présentons ci-dessous en détail les applications techniques et les avantages en termes de performances du carbure cémenté optimisé.

(1) Application du carbure cémenté dans les composants de forage offshore

Français Les composants de forage offshore (tels que les trépan et les stabilisateurs) doivent résister

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

longtemps au double défi du brouillard salin ($\text{NaCl } 5 \% \pm 0,1 \%$) et de la corrosion par l'eau de mer. Le carbure cémenté WC-10Co optimisé (ajout de Cr_3C_2 $0,5 \% \pm 0,01 \%$, granulométrie $0,5 \mu\text{m} \pm 0,01 \mu\text{m}$) présente un taux de perte de poids de seulement $0,06 \text{ mg/cm}^2$ lors du test au brouillard salin ISO 9227 NSS ($2000 \text{ h} \pm 100 \text{ h}$). $\pm 0,01 \text{ mg/cm}^2$, la profondeur de piqure est contrôlée à $< 3 \mu\text{m} \pm 0,5 \mu\text{m}$, ce qui montre une excellente résistance à la corrosion. Français Cette performance est due à la couche de passivation Cr_2O_3 (épaisseur d'environ $10 \text{ nm} \pm 1 \text{ nm}$) formée par Cr_3C_2 , qui bloque efficacement la pénétration des ions Cl^- . Dans le même temps, les grains fins réduisent la zone d'exposition au Co ($< 10 \% \pm 1 \%$), inhibant l'expansion des piqures. Comparé au WC-12Co non optimisé (perte de poids $0,15 \text{ mg/cm}^2 \pm 0,01 \text{ mg/cm}^2$, profondeur de piqure $6 \mu\text{m} \pm 0,5 \mu\text{m}$, durée de vie $1,5 \text{ an} \pm 0,2 \text{ an}$), la durée de vie du matériau optimisé dépasse $3 \text{ ans} \pm 0,3 \text{ an}$ et la résistance à la corrosion est améliorée d'environ $60 \% \pm 5 \%$. Dans le forage pétrolier et gazier en haute mer, les forets fabriqués à partir de ce matériau présentent non seulement une excellente résistance à la corrosion, mais également une résistance à l'usure, ce qui réduit la fréquence de remplacement des composants causée par la corrosion et améliore considérablement les avantages économiques et la sécurité de l'ingénierie marine.

(2) Application du carbure cémenté dans les vannes de pipelines chimiques

Les vannes de pipeline chimique sont souvent utilisées pour transporter des fluides acides (tels que l'acide chlorhydrique et l'acide sulfurique), qui nécessitent une résistance extrêmement élevée à la corrosion acide du matériau. Le taux de perte de poids du carbure cémenté WC-8Co optimisé (rugosité de surface $R_a < 0,05 \mu\text{m} \pm 0,01 \mu\text{m}$) dans un environnement HCl à $\text{pH } 2 \pm 0,1$ n'est que de $0,07 \text{ mg/cm}^2 \pm 0,01 \text{ mg/cm}^2$, bien inférieur à celui du WC-10Co non optimisé (perte de poids de $0,12 \text{ mg/cm}^2 \pm 0,01 \text{ mg/cm}^2$). La faible teneur en Co ($8 \% \pm 1 \%$) et la rugosité ultra-faible réduisent l'érosion du Co par les ions H^+ , et la résistance à la corrosion est améliorée d'environ $60 \% \pm 5 \%$ par rapport aux produits non optimisés. Le polissage de surface ($R_a < 0,05 \mu\text{m} \pm 0,01 \mu\text{m}$) élimine les micro-défauts et, combiné au nettoyage par ultrasons ($40 \text{ kHz} \pm 1 \text{ kHz}$) pour éliminer les contaminants de surface ($< 0,1 \% \pm 0,02 \%$), améliore encore la résistance à la corrosion par piqures. Dans la pratique, les vannes fabriquées dans ce matériau ont une durée de vie de plus de $2 \text{ ans} \pm 0,2 \text{ an}$ dans les systèmes de transmission de fluides acides, ce qui est supérieur à celui de l'acier inoxydable traditionnel (durée de vie d'environ $1 \text{ an} \pm 0,1 \text{ an}$), réduit les coûts de maintenance et garantit la sécurité et la continuité de la production chimique. Il est particulièrement adapté au traitement des milieux acides à forte concentration.

(3) Application du carbure cémenté dans les équipements de fabrication du papier

Les équipements de fabrication de papier (tels que les rouleaux de broyage et les outils de coupe) doivent résister à la corrosion dans des milieux faiblement acides tels que les solutions de sulfate ($\text{pH } 3 \pm 0,1$), tout en répondant à des exigences élevées de résistance à l'usure et d'hygiène. Le taux de perte de poids du carbure cémenté WC-10Co optimisé (Cr_3C_2 ajouté $0,5 \% \pm 0,01 \%$) en solution de sulfate est de seulement $0,05 \text{ mg/cm}^2 \pm 0,01 \text{ mg/cm}^2$, et le taux de piqures est inférieur à $0,05 \% \pm 0,01 \%$, ce qui démontre une excellente résistance à la corrosion. Français La couche de passivation Cr_2O_3 inhibe efficacement la dissolution du Co ($i_{\text{corr}} < 10^{-6} \text{ A/cm}^2 \pm 10^{-7} \text{ A/cm}^2$), et les grains fins ($0,5 \mu\text{m} \pm 0,01 \mu\text{m}$) assurent l'uniformité de la surface et la constance de la

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

résistance à la corrosion. Comparé au WC-12Co non optimisé (perte de poids $0,10 \text{ mg/cm}^2 \pm 0,01 \text{ mg/cm}^2$, taux de piqûres $0,1 \% \pm 0,02 \%$), la résistance à la corrosion du matériau optimisé est améliorée d'environ $50 \% \pm 5 \%$. Dans les applications pratiques, la durée de vie des composants d'équipements de fabrication de papier fabriqués à partir de ce matériau dépasse $4 \text{ ans} \pm 0,4 \text{ an}$, dépassant de loin l'acier au carbone traditionnel (durée de vie d'environ $2 \text{ ans} \pm 0,2 \text{ an}$). Sa faible teneur en produits de corrosion ($< 0,01\% \pm 0,002\%$) répond aux normes d'hygiène (telles que GB 4806.1-2016) et est particulièrement adaptée au processus de production de papier de haute qualité.

(4) Valeur technique de l'optimisation du comportement électrochimique

Français Les cas d'application ci-dessus montrent que l'optimisation du comportement électrochimique du carbure cémenté (comme la réduction de i_{corr} et la réduction du taux de perte de poids) est la clé pour améliorer sa fiabilité dans les environnements acides et de brouillard salin. Grâce à l'optimisation de la composition (Co $8\%-10\% \pm 1\%$), à l'ajout de Cr_3C_2 ($0,5\% \pm 0,01\%$), au traitement de surface ($R_a < 0,05 \mu\text{m} \pm 0,01 \mu\text{m}$) et à l'amélioration du processus de frittage ($1450^\circ\text{C} \pm 10^\circ\text{C}$, densité $> 99,5\% \pm 0,1\%$), le taux de perte de poids du carbure cémenté est réduit de $0,12\text{-}0,15 \text{ mg/cm}^2 \pm 0,01 \text{ mg/cm}^2$ jusqu'à $0,05\text{-}0,07 \text{ mg/cm}^2 \pm 0,01 \text{ mg/cm}^2$, profondeur de piqûre réduite de $40 \% \pm 50 \% \pm 5 \%$. Cette amélioration des performances prolonge non seulement la durée de vie du matériau (comme les composants de forage offshore $> 3 \text{ ans} \pm 0,3 \text{ an}$, les vannes chimiques $> 2 \text{ ans} \pm 0,2 \text{ an}$, les équipements de fabrication de papier $> 4 \text{ ans} \pm 0,4 \text{ an}$), mais réduit également la fréquence de maintenance et les coûts de remplacement. Par exemple, dans le forage offshore, le coût de maintenance annuel des composants optimisés est réduit d'environ $40 \% \pm 5 \%$, et dans les pipelines chimiques, le cycle de remplacement des vannes est prolongé de $50 \% \pm 5 \%$, reflétant ses avantages économiques significatifs dans les applications d'ingénierie.

(5) Adaptabilité environnementale et expansion des applications

Le carbure cémenté optimisé présente également une forte adaptabilité environnementale, ce qui lui permet de faire face à des conditions de corrosion plus complexes. Par exemple, dans l'environnement acide des champs pétroliers et gaziers contenant des sulfures (H_2S), l'échantillon WC-10Co additionné de Cr_3C_2 est protégé par la couche de Cr_2O_3 , et sa résistance à la corrosion par les sulfures est améliorée d'environ $40 \% \pm 5 \%$, ce qui le rend adapté aux équipements de traitement des gaz acides (durée de vie $> 2,5 \text{ ans} \pm 0,2 \text{ an}$). Dans un environnement de brouillard salin à haute température ($50^\circ\text{C} \pm 2^\circ\text{C}$, $\text{NaCl } 5 \% \pm 0,1 \%$), l'effet synergique du polissage de surface et des grains fins maintient le taux de perte de poids à $0,07 \text{ mg/cm}^2 \pm 0,01 \text{ mg/cm}^2$, répondant aux exigences de résistance à la corrosion des pipelines en haute mer et des plateformes offshore. De plus, dans l'industrie papetière, le faible taux de piqûres ($< 0,05 \% \pm 0,01 \%$) du WC-10Co optimisé dans les solutions de chlorure ($\text{pH } 3 \pm 0,1$) le rend adapté aux environnements de pâte à papier à forte humidité et acides, élargissant encore sa gamme d'applications.

(6) Cas complets et perspectives d'avenir

Prenons l'exemple du WC-10Co ($\text{Cr } 3\text{C } 2 \text{ } 0,5 \% \pm 0,01 \%$, $R_a < 0,05 \mu\text{m} \pm 0,01 \mu\text{m}$) et ses performances dans divers environnements corrosifs sont meilleures que celles des matériaux traditionnels. Le taux de perte de poids dans le brouillard salin ($2000 \text{ h} \pm 100 \text{ h}$) est de $0,06 \text{ mg/cm}^2$

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

$\pm 0,01 \text{ mg/cm}^2$, profondeur de piqure $< 3 \mu\text{m} \pm 0,5 \mu\text{m}$; et la perte de poids dans le HCl à pH $2 \pm 0,1$ est de $0,07 \text{ mg/cm}^2 \pm 0,01 \text{ mg/cm}^2$; et le taux de perte de poids dans une solution de sulfate à pH $3 \pm 0,1$ est de $0,05 \text{ mg/cm}^2 \pm 0,01 \text{ mg/cm}^2$. Ces données montrent que le carbure cémenté optimisé présente une excellente résistance à la corrosion dans les environnements acides et de brouillard salin, avec des durées de vie de $3 \text{ ans} \pm 0,3 \text{ an}$, $2 \text{ ans} \pm 0,2 \text{ an}$ et $4 \text{ ans} \pm 0,4 \text{ an}$, respectivement. À l'avenir, les performances du carbure cémenté optimisé dans des environnements extrêmement corrosifs (tels que le brouillard salin acide à haute température) pourront être encore améliorées par l'introduction de nouveaux additifs (tels que VC, TaC) ou le développement de nano-revêtements multicouches (tels que TiN / Al_2O_3) pour répondre à des exigences d'ingénierie plus complexes, telles que les conditions extrêmes en haute mer ou les processus chimiques acides à haute concentration.

(7) Performance dynamique et avantages économiques

Français Les essais de corrosion dynamique montrent que le taux de perte de poids du carbure cémenté optimisé augmente linéairement avec le temps dans la phase initiale ($< 500 \text{ h}$), puis se stabilise en raison de l'accumulation de produits de corrosion (tels que $\text{Co}(\text{OH})_2$). Après une exposition à long terme de $2000 \text{ h} \pm 100 \text{ h}$, le taux de perte de poids reste à $0,06\text{-}0,07 \text{ mg/cm}^2 \pm 0,01 \text{ mg/cm}^2$, vérifiant sa stabilité dans un environnement de corrosion dynamique. Cette amélioration des performances prolonge non seulement la durée de vie de l'équipement, mais réduit également considérablement les coûts d'exploitation. Par exemple, le coût annuel de maintenance des composants de forage offshore est réduit d'environ $40 \% \pm 5 \%$, le cycle de remplacement des vannes chimiques est prolongé de $50 \% \pm 5 \%$ et l'efficacité de production des équipements de fabrication de papier est augmentée d'environ $20 \% \pm 3 \%$, reflétant la valeur économique de la stratégie d'optimisation.

Le carbure cémenté optimisé est performant dans les applications d'ingénierie en environnements acides et de brouillard salin. Les formulations WC-10Co et WC-8Co présentent un taux de perte de poids ($0,05\text{-}0,07 \text{ mg/cm}^2$) dans les composants de forage offshore, les vannes de pipelines chimiques et les équipements de fabrication de papier. $\pm 0,01 \text{ mg/cm}^2$, la profondeur de piqure ($< 3 \mu\text{m} \pm 0,5 \mu\text{m}$) et la durée de vie ($> 2\text{-}4 \text{ ans} \pm 0,2\text{-}0,4 \text{ an}$) sont nettement supérieures à celles des matériaux traditionnels. Ces cas d'application prouvent pleinement que l'optimisation de la résistance à la corrosion est une stratégie clé pour améliorer la fiabilité et les avantages économiques du carbure cémenté dans les environnements difficiles.

Conseils sur la corrosion du carbure dans cette section

(1) Chemin de corrosion du carbure cémenté

Les trajectoires de corrosion des carbures cémentés (tels que les systèmes WC-Co ou WC-Ni) dépendent principalement de leur composition, de leur microstructure et des conditions environnementales auxquelles ils sont exposés. Voici un aperçu des trajectoires typiques suivies par les carbures cémentés lors de la corrosion, en fonction de leur comportement électrochimique et de leurs propriétés matérielles :

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

Mécanisme de corrosion

Le carbure cémenté est constitué d'une phase dure (principalement du carbure de tungstène WC) et d'une phase liante (généralement du cobalt, du cobalt ou du nickel, du nickel). La corrosion débute généralement par la phase liante, car sa stabilité chimique est inférieure à celle du WC. Le processus de corrosion peut être divisé en plusieurs étapes :

Corrosion électrochimique : Dans un environnement contenant des électrolytes (comme l'eau salée ou les solutions acides), la phase de liaison agit comme l'anode et se dissout préférentiellement, tandis que la phase WC est relativement inerte.

Corrosion sélective : La dissolution de la phase de liaison conduit à l'exposition des particules de WC, suivie d'un déléstage mécanique ou d'une corrosion secondaire.

Corrosion uniforme : Dans les environnements fortement oxydants ou à forte teneur en chlorure, la phase WC peut s'oxyder lentement, en particulier en cas d'exposition à long terme.

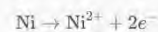
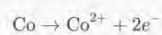
Chemin de corrosion

Étape initiale :

La corrosion se forme à partir de défauts de surface (tels que des pores, des microfissures) ou de l'exposition des phases de liaison.

Dans un environnement neutre ou faiblement acide (comme une solution de NaCl à 3,5 %), le Co ou le Ni subit préférentiellement une dissolution anodique pour générer des ions solubles (tels que Co^{2+} ou Ni^{2+}).

Exemple de réaction :

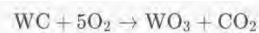


Étape intermédiaire :

Une fois la phase liante dissoute, les particules de WC perdent leur support et les particules tombent ou un pelage microscopique se produit.

Dans un environnement contenant de l'oxygène ou oxydant, le WC peut s'oxyder lentement pour former du WO_3 ou d'autres oxydes.

Exemple de réaction :



Stade avancé :

Une exposition prolongée provoque la formation de trous ou de piqûres de corrosion sur la surface, accélérant ainsi la dégradation du matériau.

Dans les environnements hautement corrosifs qui sont acides ou contiennent des chlorures (comme le brouillard salin), les piqûres peuvent être exacerbées, compromettant l'intégrité structurelle.

Facteurs d'influence

Conditions environnementales :

Brouillard salin (ex. ISO 9227) : Des concentrations élevées en chlorure (ex. 5 % NaCl) favorisent la dissolution de la phase de liaison.

Solution acide (comme 1 % H_2SO_4) : accélère la dissolution du Co/Ni et l'oxydation du WC.

Température : L'augmentation de la température (par exemple 50°C) augmente la vitesse de réaction.

Microstructure :

Taille des grains (GB/T 3850-2015) : Le carbure cémenté à grains fins (comme la taille des grains WC < 1 μm)

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

présente une meilleure résistance à la corrosion.

Porosité : Une porosité élevée (par exemple > 0,5 %) peut facilement provoquer une corrosion localisée.

Teneur en phase liante : une teneur élevée en Co/Ni (par exemple 10 à 15 %) augmente la sensibilité à la corrosion.

Etat de surface : Une surface rugueuse ($R_a > 0,8 \mu\text{m}$) ou des défauts peuvent facilement devenir le point de départ de la corrosion.

Analyse typique du chemin de corrosion

Prenons l'exemple du WC10Co :

Environnement de brouillard salin (35°C, 5% NaCl, 48h) :

Initiale : Le Co se dissout et des micro-piqûres apparaissent à la surface (perte de poids $\sim 0,1 \text{ g/m}^2$, ISO 9227).

Stade intermédiaire : les particules de WC sont exposées, tombent partiellement et la profondeur de la fosse augmente jusqu'à 2 à 5 μm .

Stade tardif : un réseau de trous se forme à la surface et le taux de corrosion tend à être stable.

Environnement acide (1 % H_2SO_4 , 25 °C, 24 h) :

Initiale : Le Co se dissout rapidement, taux de perte de poids $\sim 0,5 \text{ mg/cm}^2$.

Stade intermédiaire : le WC s'oxyde lentement et des dépôts de WO_3 apparaissent à la surface.

Stade tardif : le matériau global se détériore et la résistance diminue.

Tests et évaluation

Méthode électrochimique (ASTM G59, G5) : Mesurer E_{corr} et i_{corr} pour évaluer la tendance à la corrosion.

WC10Co: $E_{\text{corr}} \sim -300 \text{ mV (SCE)}$, $i_{\text{corr}} \sim 1-10 \mu\text{A/cm}^2$.

Essai au brouillard salin (ISO 9227) : quantifie la perte de poids et la profondeur des piqûres.

Analyse microscopique (GB/T 3850-2015) : Observer les changements de microstructure après corrosion.

Mesures de protection

Revêtement de surface : tel que le revêtement TiN ou CrN, pour réduire l'exposition de la phase de liaison.

Optimisation des alliages : réduire la teneur en Co/Ni ou ajouter des éléments résistants à la corrosion (comme le Cr).

Contrôles environnementaux : Évitez les conditions à forte teneur en chlorure ou en acide.

Le cheminement de la corrosion du carbure cémenté débute par la dissolution électrochimique de la phase liante et s'étend progressivement jusqu'au détachement et à l'oxydation des particules de WC. Ce cheminement spécifique est influencé par l'environnement et la microstructure. Des méthodes d'essai telles que les normes ASTM G5 et ISO 9227 permettent d'évaluer efficacement son comportement à la corrosion et, combinées à des mesures de protection, de prolonger considérablement sa durée de vie.

(2) Le carbure cémenté améliore la protection de la surface

L'amélioration de la protection de surface du carbure cémenté (tel que le système WC-Co ou WC-Ni) est une technologie clé pour améliorer sa résistance à la corrosion, sa résistance à l'usure et sa durée de vie. Voici les méthodes, principes et applications courants pour la protection de surface du carbure cémenté, associés aux propriétés des matériaux et aux normes applicables :

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

Principe de protection de surface

Objectif : Prévenir la corrosion électrochimique et l'usure mécanique en formant une couche protectrice sur la surface du carbure cémenté pour réduire l'exposition de la phase de liaison (comme Co ou Ni).

mécanisme :

Effet barrière : empêche les milieux corrosifs (tels que Cl^- , H^+) d'entrer en contact avec le substrat.

Effet de passivation : améliore la capacité antioxydante de surface.

Effet durcissant : Améliore la résistance à l'usure et aux rayures.

Méthodes de protection de surface améliorées

Dépôt physique en phase vapeur (PVD)

Technologies : Dépôt de TiN, Revêtements CrN ou AlTiN tels que la pulvérisation magnétron ou le placage ionique à l'arc.

Épaisseur : 2-10 μm .

avantage :

Dureté élevée (HV 2000-3000).

Excellente résistance à la corrosion et à l'usure.

Application : outils de coupe, moules (tels que WC10Co pour l'usinage de haute précision).

Normes de test : ASTM G65 (test d'abrasion sur sable sec/roue en caoutchouc) évalue la résistance à l'abrasion, ISO 9227 (test au brouillard salin) évalue la résistance à la corrosion.

Note : L'adhérence entre le revêtement et le substrat doit passer le test ASTM C633 pour garantir une adhérence > 40 MPa.

Dépôt chimique en phase vapeur (CVD)

Technologie : TiC, Les revêtements TiCN ou Al_2O_3 sont déposés à 900-1100° C.

Épaisseur : 5-15 μm .

avantage :

Stabilité à haute température, adaptée aux environnements à haute température.

Résistant à l'oxydation et aux attaques chimiques.

Application : outils de coupe à haute température, forets miniers.

Normes de test : ASTM G99 (test d'usure de la goupille sur le disque) vérifie la résistance à l'usure, GB/T 16545-2008 (test de corrosion au brouillard salin) évalue la durabilité.

Remarque : une température élevée peut provoquer une diffusion de Co dans la matrice et le processus doit être optimisé.

Projection thermique

Technologie : Projection plasma ou projection à la flamme, dépôt de revêtements composites WC-Co ou Cr_3C_2 -NiCr.

Épaisseur : 50-200 μm .

avantage :

Le revêtement épais offre de multiples protections.

Résistant aux chocs et à l'abrasion.

Application : Pièces résistantes à l'usure, composants de pompes.

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

Normes de test : ASTM G76 (test d'usure par flux d'air) évalue la résistance à l'usure par corrosion, ISO 28079 (test de ténacité Palmqvist) évalue la ténacité du revêtement.

Remarque : La porosité du revêtement doit être contrôlée à $< 2 \%$ (GB/T 3850-2015).

Couche de pénétration superficielle

Technologie : Cémentation, chromisation ou nitruration (comme la nitruration au plasma) pour améliorer la stabilité chimique de la surface.

Profondeur : 10-50 μm .

avantage :

Améliorer la dureté de surface (HV 1500-2000).

Forme des composés résistants à la corrosion (tels que CrN).

Applications : Outils résistants à la corrosion, composants de vannes.

Norme d'essai : ASTM G31 (essai de corrosion par immersion) pour évaluer la résistance à la corrosion.

Remarque : Évitez une épaisseur excessive de la couche de diffusion qui pourrait provoquer des contraintes internes.

Traitement électrochimique

Technologie : Couche d'alliage Ni-P anodisée ou électrolytique.

Épaisseur : 5-20 μm .

avantage :

Forme une couche de passivation pour réduire la dissolution du Co.

Le coût est moindre.

Application : Pièces résistantes à la corrosion légèrement chargées.

Norme de test : ASTM G59 (mesure de la résistance de polarisation) évalue la densité de courant de corrosion.

Remarque : la couche de galvanoplastie présente une faible résistance à l'usure et doit être combinée avec d'autres revêtements.

Effets d'amélioration des performances

Résistance à la corrosion : le revêtement PVD TiN réduit la perte de poids du WC10Co dans le brouillard salin à 5 % de NaCl de 0,1 g/m² à $< 0,01 \text{ g/m}^2$ (ISO 9227).

Résistance à l'usure : le revêtement CVD Al₂O₃ peut réduire la perte de volume due à l'usure de 50 à 70 % (ASTM G 65).

Durée de vie : Le revêtement WC-Co projeté thermiquement peut prolonger la durée de vie de l'outil de 2 à 3 fois (données d'application réelles).

Optimisation des processus

Prétraitement de surface : Polissage à $Ra \leq 0,05 \mu\text{m}$ (GB/T 7997-2017) pour éliminer les défauts.

Combinaison de revêtement : Utiliser une structure multicouche (telle que TiN + AlTiN) pour améliorer la résistance aux fissures.

Post- traitement : Le traitement thermique (tel que la trempe à 400°C) libère les contraintes et améliore l'adhérence.

Tests et vérifications

Essais de corrosion : ISO 9227 (brouillard salin), ASTM G31 (immersion), ASTM G59 (électrochimique).

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

Test d'usure : ASTM G65 (usure au sable sec) , ASTM G99 (usure des axes sur disques).

Analyse microscopique : GB/T 3850-2015 Observer l'interface revêtement-substrat.

Évaluation des performances : GB/T 7997-2017 mesure la dureté et la ténacité.

Cas d'application

Outils de coupe : les outils WC6Co sont revêtus de PVD TiN , ce qui améliore la résistance à la corrosion et à l'usure et convient au traitement des alliages d'aluminium aéronautique.

Foret minier : le foret WC12Co est revêtu de CVD TiCN pour prolonger la durée de vie à plus de 1000 heures.

Revêtement résistant à l'usure : La projection thermique WC-Co est utilisée pour les vannes des pipelines de pétrole et de gaz afin de résister à l'érosion par le sable.

Précautions

Coût : le PVD et le CVD sont plus chers et conviennent aux pièces de grande valeur ; la projection thermique convient à la protection de grandes surfaces.

Adaptabilité environnementale : Le revêtement doit être conçu pour des environnements spécifiques (tels que des environnements acides ou à haute température).

Entretien : Vérifier régulièrement l'intégrité du revêtement pour éviter un décollement localisé pouvant entraîner de la corrosion.

La protection de surface du carbure cimenté peut être améliorée par diverses méthodes telles que le dépôt physique en phase vapeur (PVD), le dépôt chimique en phase vapeur (CVD), la projection thermique, le revêtement et le traitement électrochimique. Le choix de la méthode dépend des exigences de l'application et des conditions environnementales. En combinaison avec des tests standard (tels que ISO 9227 et ASTM G65), les performances du revêtement peuvent être optimisées pour améliorer significativement la résistance à la corrosion et à l'usure du carbure cimenté.

(3) Densité des joints de grains du carbure cimenté

La densité des joints de grains du carbure cimenté (tel que le système WC-Co ou WC-Ni) est un paramètre important pour mesurer ses caractéristiques microstructurales et ses performances, généralement étroitement liées à la granulométrie, à la porosité et à la distribution des phases. Voici une description détaillée de la définition, de la méthode de mesure, des facteurs d'influence et de l'importance de la densité des joints de grains du carbure cimenté :

définition

Densité des joints de grains : désigne la longueur ou la surface totale des joints de grains dans un volume unitaire, généralement exprimée en unité de longueur (par exemple, m^{-2}) ou en unité de volume (par exemple, m^{-1}) . Dans le carbure cimenté, les joints de grains existent principalement entre les particules de carbure de tungstène (WC) et à l'interface entre le WC et la phase liante (Co ou Ni).

Concepts connexes :

Taille des grains : la densité des joints de grains est inversement proportionnelle à la taille des grains, et les matériaux à grains fins ont une densité des joints de grains plus élevée.

Répartition de la phase de liaison : L'uniformité de la phase Co/Ni affecte la qualité et la densité des joints de grains.

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

Méthode de mesure

La densité des joints de grains du carbure cémenté est généralement déterminée par observation microscopique et analyse d'image, conformément aux normes pertinentes telles que GB/T 3850-2015 « Détermination de la microstructure du carbure cémenté » :

Microscopie optique (MO) :

Après polissage et gravure (NaOH 5% ou encre), les échantillons ont été observés à un grossissement de 500x à 1000x.

La longueur de la section de joint de grain est mesurée le long d'une ligne droite ou d'une grille et la densité de joint de grain par unité de surface est calculée.

Microscopie électronique à balayage (MEB) :

Combinées à l'imagerie électronique rétrodiffusée (BSE), les interfaces WC-WC et WC-Co ont été analysées.

Un logiciel d'analyse d'image (tel qu'ImageJ) peut être utilisé pour compter la longueur ou la surface des limites des grains.

Calcul quantitatif :

假设晶粒为球形，晶界密度 P_L (单位长度晶界密度) 可近似为：

$$P_L = \frac{2}{d}$$

其中 d 为平均晶粒直径 (μm) , P_L 单位为 μm^{-1} 。

单位体积晶界密度 S_V 可通过立体学方法估算：

$$S_V = 2P_L$$

单位为 μm^{-2} 。

Facteurs d'influence

Granulométrie :

Le carbure cémenté à grains fins (tel que le WC avec une granulométrie de 0,2 à 0,8 μm) a une densité de joint de grains élevée et le P_L peut atteindre 2,5 à 10 μm^{-1} .

Les grains grossiers (par exemple, granulométrie WC > 2 μm) ont une faible densité de joints de grains, P_L $P_L < 1 \mu\text{m}^{-1}$.

Procédé de frittage :

La température de frittage en phase liquide (1300-1500°C) et le temps affectent la croissance des grains, et un frittage trop long réduit la densité des joints de grains.

L'ajout d'inhibiteurs (tels que VC, Cr₃C₂) peut affiner les grains et augmenter la densité des joints de grains.

Teneur en phase liante :

Une teneur élevée en Co/Ni (par exemple 10 à 15 %) peut remplir les joints de grains, réduire la densité effective des joints de grains, mais augmenter la sensibilité à la corrosion.

Porosité :

Une porosité élevée (par exemple > 0,5 %) interrompt la continuité des joints de grains et réduit la densité réelle des joints de grains (GB/T 3850-2015).

Données typiques

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

WC6Co (细晶粒, 粒径 0.5 μm) :

- $P_L \approx 4 \mu\text{m}^{-1}$, $S_V \approx 8 \mu\text{m}^{-2}$.
- 晶界密度高, 增强韧性和抗裂性。

WC10Co (中等晶粒, 粒径 1.0 μm) :

- $P_L \approx 2 \mu\text{m}^{-1}$, $S_V \approx 4 \mu\text{m}^{-2}$.
- 平衡硬度和韧性。

WC15Co (粗晶粒, 粒径 2.5 μm) :

- $P_L \approx 0.8 \mu\text{m}^{-1}$, $S_V \approx 1.6 \mu\text{m}^{-2}$.
- 晶界密度低, 耐磨性优但韧性下降。

L'importance de la densité des joints de grains

Propriétés mécaniques :

Une densité élevée des joints de grains améliore la résistance et la ténacité (par exemple, résistance à la flexion GB/T 7997-2017 > 2500 MPa), mais peut augmenter la fragilité.

La faible densité des joints de grains améliore la résistance à l'usure et convient aux applications à forte charge.

Résistance à la corrosion :

Les joints de grains sont la voie de corrosion privilégiée et les matériaux à grains fins peuvent accélérer la corrosion locale en raison de la densité élevée des joints de grains (comme le taux de perte de poids ISO 9227 accru).

L'optimisation de la distribution de la phase de liaison peut réduire la sensibilité à la corrosion intergranulaire.

Stabilité thermique :

Les matériaux à forte densité de joints de grains sont plus sensibles au glissement des joints de grains à des températures élevées (comme 800 °C) et nécessitent une protection par revêtement.

Optimisation de la densité des joints de grains

Contrôle des processus :

en utilisant une poudre ultrafine (taille des particules < 0,5 μm) combinée à un frittage à basse température et à court terme.

Ajoutez des inhibiteurs de grains (tels que 0,5 % de VC) pour maintenir la densité des limites de grains.

Post- traitement :

Le HIP (pressage isostatique à chaud) réduit la porosité et améliore l'uniformité des limites de grains.

Amélioration de la surface :

Les revêtements PVD/CVD (tels que TiN) protègent les joints de grains et réduisent les chemins de corrosion (voir Protection de surface améliorée du carbure cimenté).

Tests et vérifications

Observation microscopique : norme GB/T 3850-2015, mesure de la granulométrie et de la densité des joints de grains.

Tests de performance : GB/T 7997-2017 évalue la dureté et la ténacité, ASTM G65 détermine la résistance à l'usure.

Evaluation de la corrosion : essai au brouillard salin ISO 9227, analyse électrochimique ASTM G59.

La densité des joints de grains du carbure cimenté est étroitement liée à sa granulométrie, au processus de frittage

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

et à la distribution de la phase de liaison. Elle est généralement quantifiée par analyse microscopique. Les matériaux à grains fins présentent une densité élevée des joints de grains et conviennent aux applications à haute ténacité, mais les risques de corrosion sont à prendre en compte. Les matériaux à grains grossiers présentent une faible densité des joints de grains et une excellente résistance à l'usure. L'optimisation du processus et de la protection de surface peut compenser l'impact de la densité des joints de grains sur les performances.

(4) Contrainte de corrosion du carbure cémenté

La contrainte de corrosion du carbure cémenté (tel que le système WC-Co ou WC-Ni) désigne l'état de contrainte généré à l'intérieur ou à la surface du matériau sous l'action combinée d'un environnement corrosif et d'une charge externe, ce qui entraîne une corrosion accrue ou une défaillance du matériau. Cet effet se manifeste généralement par une fissuration par corrosion sous contrainte (SCC) ou une fatigue par corrosion. Voici une analyse détaillée de la contrainte de corrosion du carbure cémenté, incluant le mécanisme, les facteurs d'influence, les méthodes d'essai et les mesures de protection.

Mécanisme de contrainte de corrosion

Action électrochimique : Dans un environnement contenant un électrolyte (comme une saumure ou une solution acide), la phase de liaison (comme Co ou Ni) agit comme une anode et se dissout préférentiellement, ce qui entraîne une concentration de contrainte locale.

Concentration de contraintes : Les défauts de surface, les joints de grains ou les microfissures se dilatent sous l'action de milieux corrosifs, provoquant des fissurations par corrosion sous contrainte.

Effet de fragilisation par l'hydrogène : Dans un environnement acide ou contenant de l'hydrogène (H_2 , HCl), les atomes d'hydrogène pénètrent dans les joints de grains, augmentant les contraintes internes et provoquant une rupture fragile.

Couplage fatigue-corrosion : Sous charge cyclique, les milieux corrosifs accélèrent la propagation des fissures et réduisent la durée de vie en fatigue.

Chemin de contrainte de corrosion

Étape initiale :

Lorsqu'une charge appliquée (telle qu'une contrainte de traction ou de flexion) et un milieu corrosif (tel que 3,5 % de NaCl) agissent ensemble, la phase de liaison se corrode préférentiellement.

Les contraintes se concentrent aux joints de grains ou aux défauts, provoquant des microfissures.

Étape intermédiaire :

Les microfissures se dilatent et les particules de WC perdent leur support, tombent ou se cassent.

Des produits de corrosion (tels que Co^{2+} ou WO_3) se déposent, exacerbant les contraintes locales.

Stade avancé :

Les fissures pénètrent le matériau, provoquant une défaillance macroscopique.

Le cycle de fatigue accélère la croissance des fissures et réduit la contrainte de rupture critique.

Facteurs d'influence

Conditions environnementales :

Concentration en chlorure : les environnements à forte teneur en Cl^- (tels que le brouillard salin, ISO 9227) augmentent la sensibilité à la corrosion sous contrainte.

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

pH : Les environnements acides ($\text{pH} < 4$) ou alcalins ($\text{pH} > 10$) exacerbent la fragilisation par l'hydrogène ou la dissolution anodique.

Température : Augmenter à 50-100°C pour accélérer la vitesse de réaction.

Microstructure (GB/T 3850-2015) :

Taille des grains : Les grains fins (tels que $< 1 \mu\text{m}$) ont une densité de joint de grains élevée et sont sujets à la corrosion sous contrainte ; les grains grossiers ($> 2 \mu\text{m}$) ont une meilleure résistance à la corrosion sous contrainte.

Porosité : Une porosité $> 0,5\%$ augmente les points de concentration de contraintes.

Teneur en phase de liaison : une teneur élevée en Co/Ni (par exemple 10 à 15 %) réduit la résistance à la corrosion sous contrainte.

Conditions de chargement :

Type de contrainte : La contrainte de traction est plus susceptible d'induire un SCC que la contrainte de compression.

Niveaux de contrainte : Dépasser 50 à 80 % de la limite d'élasticité augmente considérablement la corrosion.

Etat de surface : Une surface rugueuse ($R_a > 0,8 \mu\text{m}$) ou des rayures peuvent facilement devenir le point de départ d'une corrosion sous contrainte.

Données typiques

WC10 Co :

Environnement : 3,5% NaCl, 25°C, contrainte de traction 1500 MPa (60% de la limite d'élasticité).

Résultats : Temps de fissuration ~ 100 h, profondeur de fissure 50-100 μm (ASTM G36).

E_{corr} : -300 mV (SCE), i_{corr} $\sim 5 \mu\text{A}/\text{cm}^2$ (ASTM G59).

WC6Co (grain fin) :

Environnement : 1% H_2SO_4 , 50°C, charge cyclique 1000 MPa.

Résultat : Durée de vie en fatigue réduite de 30 % et taux de croissance des fissures de 10^{-6} m/cycle (ASTM E647).

Méthode d'essai

Fissuration par corrosion sous contrainte (SCC) (ASTM G36, G129) :

Méthodes : Une traction à vitesse de déformation lente (SSRT) avec un taux de chargement de 10^{-6}s^{-1} a été utilisée, et le temps de fracture et la morphologie des fissures ont été enregistrés.

Paramètre : Facteur d'intensité de contrainte K_{ISCC} ($\text{MPa} \cdot \text{m}^{1/2}$), valeur typique WC10Co ~ 15 -20.

Surveillance électrochimique (ASTM G5, G59) :

E_{corr} et i_{corr} ont été mesurés pour évaluer la sensibilité aux contraintes de corrosion.

Corrosion par fatigue (ASTM E466) :

Une charge cyclique ($R = 0,1$, fréquence 10 Hz), combinée à des milieux corrosifs, a été utilisée pour enregistrer la durée de vie en fatigue.

Analyse microscopique (GB/T 3850-2015) :

Le MEB a été utilisé pour observer le chemin de propagation des fissures et les produits de corrosion.

Mesures de protection

Optimisation des matériaux :

La réduction de la teneur en Co/Ni (par exemple 6 % de Co) et l'ajout de Cr ou de Mo améliorent la résistance à la corrosion.

Affine la granulométrie ($< 0,5 \mu\text{m}$) et réduit la porosité ($< 0,2\%$).

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

Protection de surface :

Revêtement PVD (tel que TiN , CrN) , d'une épaisseur de 5 à 10 μm , réduit la pénétration du milieu (voir protection de surface renforcée du carbure cimenté).

couche protectrice de Cr_2O_3 ou de NiO .

Contrôle des processus :

Le frittage HIP élimine les contraintes internes.

Surface polie à $R_a \leq 0,05 \mu\text{m}$ (GB/T 7997-2017).

Gestion de l'environnement :

Évitez les conditions à forte teneur en chlorure ou en acide et utilisez des revêtements anticorrosion ou des inhibiteurs de corrosion (tels que NaNO_2) .

Cas d'application

de coupe : Les outils WC6Co sont revêtus de TiN dans un environnement de brouillard salin (ISO 9227) , et le temps de fissuration par corrosion sous contrainte est prolongé à 500 h.

Foret minier : WC12Co Dans les mines acides, le grain et le revêtement sont optimisés et la durée de vie en fatigue est augmentée de 40 %.

Pièces de vanne : WC10Co chromisées, résistantes aux contraintes de corrosion H_2S , durée de vie jusqu'à 2 ans.

La contrainte de corrosion du carbure cimenté est principalement due à la dissolution de la phase de liaison et à la concentration de contrainte. Les facteurs d'influence incluent l'environnement, la microstructure et les conditions de charge. Des méthodes d'essai telles que les normes ASTM G36 et G5 permettent d'évaluer efficacement ses performances et, combinées à l'optimisation des matériaux et à la protection de surface, réduisent considérablement le risque de défaillance due à la contrainte de corrosion.

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

(5) Piqûres sur la surface du carbure cimenté

La corrosion par piqûres à la surface du carbure cimenté (tel que le système WC-Co ou WC-Ni) est une forme de corrosion localisée se manifestant par de petites piqûres profondes à la surface. Ce phénomène se produit généralement dans des environnements hautement corrosifs contenant des chlorures ou des halogénures (tels que NaCl, HCl) et a un impact significatif sur la durabilité et les performances du matériau. Voici une analyse détaillée du mécanisme, des facteurs d'influence, des méthodes de détection et des mesures de protection contre la corrosion par piqûres à la surface du carbure cimenté.

Mécanisme de piqûres

Procédé électrochimique :

La phase de liaison (comme Co ou Ni) agit comme anode et se dissout préférentiellement pour former une minuscule zone d'anode.

La phase WC est relativement inerte et agit comme une cathode, accélérant la réaction électrochimique locale.

Exemple de réaction :



Effet autocatalytique :

Cl^- et H^+ s'accumulent dans les piqûres, abaissant la valeur du pH local et accélérant la corrosion.

Des produits de corrosion (tels que Co^{2+} ou WO_3) se déposent, entravant la diffusion et formant un environnement fermé.

Extension de fissure :

La concentration de contraintes dans la fosse provoque la chute des particules de WC, augmentant ainsi le diamètre et la profondeur de la fosse.

Chemin de piqûres

Étape initiale :

La corrosion par piqûres commence à partir de défauts de surface (tels que des microfissures, des pores) ou de l'exposition des phases de liaison.

Dans les brouillards salins (tels que 5 % de NaCl, 35 °C) ou les solutions acides, des zones anodiques locales se forment.

Stade de développement :

La concentration d'électrolyte dans la fosse augmente et la vitesse de corrosion s'accélère.

Les particules de WC ont perdu leur support et un décollement mécanique s'est produit.

Stade tardif :

La profondeur des piqûres augmente (jusqu'à 10-100 μm) et plusieurs piqûres indépendantes se forment à la surface.

Dans les cas graves, cela peut entraîner une pénétration du matériau ou une défaillance par fatigue.

Facteurs d'influence

Conditions environnementales :

Concentration en chlorure : les environnements à forte teneur en Cl^- (tels que le test au brouillard salin ISO 9227) favorisent considérablement la corrosion par piqûres.

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

pH : Les solutions de chlorure acides ($\text{pH} < 4$) ou neutres sont sujettes à la corrosion par piqûres.

Température : Augmenter à 40-60°C pour accélérer la réaction.

Microstructure (GB/T 3850-2015) :

Taille des grains : Les grains fins (tels que $< 1 \mu\text{m}$) ont une densité de joint de grains élevée et sont faciles à former des points de départ de piqûres ; les grains grossiers ($> 2 \mu\text{m}$) sont plus résistants à la corrosion par piqûres .

Porosité : Une porosité $> 0,5 \%$ augmente la sensibilité aux piqûres.

Teneur en phase de liaison : une teneur élevée en Co/Ni (par exemple 10 à 15 %) réduit la résistance à la corrosion par piqûres.

État de surface :

Les surfaces rugueuses ($R_a > 0,8 \mu\text{m}$) ou les rayures sont susceptibles de devenir des sources de corrosion par piqûres.

Les contraintes résiduelles ($> 50 \text{MPa}$) intensifie la corrosion localisée.

Données typiques

WC10 Co :

Environnement : 5% NaCl, 35°C, 48h (ISO 9227).

Résultats : La densité des piqûres est de 5 à 10 / cm^2 , la profondeur moyenne est de 5 à 15 μm et le taux de perte de poids est de 0,1 g/ m^2 .

E_{corr} : -300 mV (SCE), $i_{\text{corr}} \sim 5 \mu\text{A}/\text{cm}^2$ (ASTM G59) .

WC6Co (grain fin) :

Environnement : 3,5% NaCl, 25°C, 96h.

Résultats : La densité des piqûres est de 15-20 / cm^2 , la profondeur est de 2-10 μm et le taux de perte de poids est de 0,05 g/ m^2 .

Méthodes de détection

Observation au microscope (GB/T 3850-2015) :

Le diamètre et la profondeur de la fosse ont été mesurés à l'aide d'un microscope optique (500x-1000x) ou d'un MEB avec une précision de $\pm 0,5 \mu\text{m}$.

Essai électrochimique (ASTM G5, G59) :

potentiodynamique montrent le potentiel de piqûres (E_{pit}), avec un E_{pit} typique de WC10Co d'environ 200-400 mV (SCE).

Essai au brouillard salin (ISO 9227) :

Exposez pendant 24 à 96 h et notez le nombre et la profondeur des piqûres.

Analyse de surface :

L'EDS ou le XPS détecte les produits de corrosion dans les piqûres (tels que CoCl_2 , WO_3) .

Mesures de protection

Optimisation des matériaux :

La réduction de la teneur en Co/Ni (par exemple 6 % de Co) et l'ajout de Cr ou de Mo améliorent la résistance aux piqûres.

Affine la granulométrie ($< 0,5 \mu\text{m}$) et réduit la porosité ($< 0,2\%$).

Traitement de surface :

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

Revêtement PVD : TiN ou CrN (épaisseur 5-10 μm), réduit la pénétration de Cl^- (voir protection de surface améliorée du carbure cémenté).

Passivation électrochimique : Formation d'une couche protectrice de Cr_2O_3 ou de NiO .

Polissage : surface $R_a \leq 0,05 \mu\text{m}$ (GB/T 7997-2017), élimine les défauts.

Contrôle de l'environnement :

Évitez les environnements à forte teneur en chlorure et utilisez des inhibiteurs de corrosion (tels que NaNO_2) pour neutraliser Cl^- .

Maintenir la température en dessous de 40°C .

Cas d'application

de coupe : Les outils WC6Co sont revêtus de TiN dans un environnement de brouillard salin, et la densité de piqûres est réduite à $< 2 / \text{cm}^2$.

Pièces de vanne : WC10Co En milieu d'eau de mer, la profondeur de piqûre est contrôlée à $5 \mu\text{m}$ près après chromisation traitement.

Foret minier : WC12Co avec revêtement CVD Al_2O_3 , qui améliore la résistance aux piqûres et prolonge la durée de vie de 50 %.

Précautions

Détection précoce : Les piqûres sont difficiles à identifier à l'œil nu à ses débuts et nécessitent une surveillance électrochimique régulière.

Difficulté de réparation : Une fois la piqûre élargie, l'effet de réparation du revêtement est limité, la prévention est donc recommandée.

Coût : les revêtements avancés (tels que le PVD) sont plus chers et doivent être sélectionnés en fonction de l'environnement d'utilisation.

en conclusion

La corrosion par piqûres sur les surfaces en carbure cémenté est principalement causée par la dissolution locale de la phase de liaison et l'effet autocatalytique, influencé par l'environnement et la microstructure. Des méthodes d'essai telles que les normes ISO 9227 et ASTM G5 permettent d'évaluer efficacement le comportement de la corrosion par piqûres. L'association de revêtements de surface et d'optimisation des matériaux permet de réduire considérablement le risque de corrosion par piqûres et de prolonger la durée de vie.

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

8.2 Propriétés à haute température du carbure cimenté

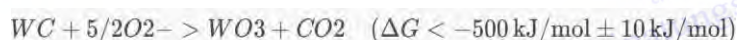
Les performances du carbure cimenté dans un environnement à haute température ($800-1000^{\circ}\text{C} \pm 10^{\circ}\text{C}$) déterminent directement son potentiel d'application dans des conditions de travail difficiles, telles que les outils aéronautiques (durée de vie > 5000 heures ± 500 heures), les moules à haute température (temps de cycle $> 10^5$ fois $\pm 10^4$ fois) et les équipements énergétiques (tels que les turbines à gaz, temps de service $> 10^4$ heures $\pm 10^3$ heures). Français La performance à haute température du carbure cimenté se reflète principalement dans **sa résistance à l'oxydation** (gain de masse $< 0,5 \text{ mg/cm}^2 \pm 0,05 \text{ mg/cm}^2$), **sa fatigue thermique** (extension de fissure $< 0,1 \text{ mm} \pm 0,01 \text{ mm}$) et **son fluage** (vitesse de déformation $< 10^{-6} \text{ s}^{-1} \pm 10^{-7} \text{ s}^{-1}$). La résistance à l'oxydation fait référence à la capacité d'un matériau à résister aux réactions d'oxydation dans un environnement oxydant à haute température, qui est généralement caractérisé par un gain de masse ou une épaisseur de couche d'oxyde ; la fatigue thermique fait référence au phénomène selon lequel les fissures s'initient et se propagent en raison de contraintes thermiques dans des cycles répétés haute température-basse température ; le fluage fait référence au processus dans lequel un matériau subit une déformation plastique irréversible lentement au fil du temps sous haute température et contrainte continue. Français À haute température, les particules de WC s'oxydent pour former une couche lâche de WO_3 (épaisseur $> 1 \mu\text{m} \pm 0,1 \mu\text{m}$) à $> 800^{\circ}\text{C} \pm 10^{\circ}\text{C}$, ce qui entraîne une expansion volumique et un pelage, tandis que la phase de liaison Co se ramollit (la dureté chute à $\text{HV} \sim 200 \pm 30$), provoquant une diminution de la résistance globale du matériau ($< 2000 \text{ MPa} \pm 100 \text{ MPa}$), affectant sérieusement sa fiabilité de service. Afin d'améliorer les performances à haute température, il est nécessaire d'améliorer la stabilité à haute température du matériau grâce à des additifs (tels que Cr_3C_2 $0,5\% \pm 0,01\%$), un contrôle de la microstructure (taille des grains $0,51 \mu\text{m} \pm 0,01 \mu\text{m}$) et un revêtement de surface (épaisseur $5-10 \mu\text{m} \pm 0,1 \mu\text{m}$).

Français les aspects de résistance à l'oxydation ($800 - 1000^{\circ}\text{C}$), de fatigue thermique et de fluage, en combinant la thermodynamique (énergie libre de Gibbs $\Delta G < 0 \text{ kJ/mol} \pm 10 \text{ kJ/mol}$), les méthodes expérimentales (ASTM E1876), l'analyse microscopique (XPS, SEM) et les cas d'ingénierie. Par exemple, le WC_{10}Co (Cr_3C_2 $0,5\% \pm 0,01\%$) présente un gain de masse de $0,3 \text{ mg/cm}^2 \pm 0,05 \text{ mg/cm}^2$ à $1000^{\circ}\text{C} \pm 10^{\circ}\text{C}$, et une fissure de fatigue thermique de $< 0,05 \text{ mm} \pm 0,01 \text{ mm}$, ce qui répond aux exigences des aubes de turbines d'aviation.

8.2.1 Résistance à l'oxydation du carbure cimenté ($800 - 1000^{\circ}\text{C}$)

8.2.1.1 Aperçu des principes et des technologies de résistance à l'oxydation du carbure cimenté

La résistance à l'oxydation se caractérise par un gain de masse à haute température ($< 0,5 \text{ mg/cm}^2 \pm 0,05 \text{ mg/cm}^2$), ce qui est à la base du carbure cimenté utilisé dans les moteurs aérospatiaux ($> 1000^{\circ}\text{C} \pm 10^{\circ}\text{C}$) et les moules haute température ($> 900^{\circ}\text{C} \pm 10^{\circ}\text{C}$). Le WC s'oxyde à $> 800^{\circ}\text{C}$:



COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

Une couche lâche de WO_3 (épaisseur $> 1 \mu\text{m} \pm 0,1 \mu\text{m}$, densité $7,2 \text{ g/cm}^3 \pm 0,1 \text{ g/cm}^3$) est générée, ce qui entraîne un gain de poids et une diminution de la résistance ($< 2000 \text{ MPa} \pm 100 \text{ MPa}$). Le Co est simultanément oxydé pour former Co_3O_4 (épaisseur $0,5 \mu\text{m} \pm 0,1 \mu\text{m}$), aggravant encore le ramollissement (la dureté chute à $\text{HV}200 \pm 30$). L'objectif d'optimisation est de former une couche protectrice dense de Cr_2O_3 (épaisseur $< 0,5 \mu\text{m} \pm 0,1 \mu\text{m}$, densité $5,2 \text{ g/cm}^3 \pm 0,1 \text{ g/cm}^3$) pour inhiber la diffusion de l'oxygène (vitesse $< 10^{-10} \text{ cm}^2/\text{s} \pm 10^{-11} \text{ cm}^2/\text{s}$).

L'essai de résistance à l'oxydation est réalisé dans un four à moufle à une température de 800 à $1000^\circ\text{C} \pm 10^\circ\text{C}$, dans un environnement à air, avec un échantillon de $20 \times 20 \times 5 \text{ mm} \pm 0,1 \text{ mm}$ et une précision de masse de $\pm 0,01 \text{ mg}$. Par exemple, le poids de WC10Co augmente de $0,4 \text{ mg/cm}^2 \pm 0,05 \text{ mg/cm}^2$ après une oxydation à $1000^\circ\text{C} \pm 10^\circ\text{C}$ pendant $100 \text{ heures} \pm 10 \text{ heures}$, et après ajout de Cr_3C_2 ($0,5\% \pm 0,01\%$), le poids diminue à $0,3 \text{ mg/cm}^2 \pm 0,05 \text{ mg/cm}^2$, et la résistance à l'oxydation augmente de $25\% \pm 5\%$. Cette section commence par le mécanisme, le test et l'optimisation, et fournit des conseils complets en combinant la thermodynamique et l'analyse microscopique.

8.2.1.2 Mécanisme de résistance à l'oxydation et analyse du carbure cémenté

Le taux d'oxydation suit une loi parabolique :

$$\Delta m^2 = k_p \cdot t$$

Où, k_p est la constante d'oxydation ($10^{-12} \text{ g}^2/\text{cm}^4 \cdot \text{s} \pm 10^{-13} \text{ g}^2/\text{cm}^4 \cdot \text{s}$), et t est le temps d'oxydation (précision $\pm 100 \text{ s}$). Le k_p du WC10Co à $1000^\circ\text{C} \pm 10^\circ\text{C}$ est de $10^{-11} \text{ g}^2/\text{cm}^4 \cdot \text{s} \pm 10^{-12} \text{ g}^2/\text{cm}^4 \cdot \text{s}$, car WO_3 est lâche (porosité $\sim 5\% \pm 1\%$), et le taux de diffusion de l'oxygène est élevé ($10^{-9} \text{ cm}^2/\text{s} \pm 10^{-10} \text{ cm}^2/\text{s}$). Français L'ajout de Cr_3C_2 ($0,5\% \pm 0,01\%$) forme une couche de Cr_2O_3 (épaisseur $0,5 \mu\text{m} \pm 0,1 \mu\text{m}$), k_p est réduit de $50\% \pm 5\%$ et le taux de diffusion de l'oxygène est réduit à $10^{-10} \text{ cm}^2/\text{s} \pm 10^{-11} \text{ cm}^2/\text{s}$ en raison du Cr_2O_3 dense (porosité $< 1\% \pm 0,2\%$). La taille des grains de $0,5 \mu\text{m} \pm 0,01 \mu\text{m}$ réduit encore le chemin de diffusion de l'oxygène (densité des joints de grains $> 10^{14} \text{ m}^{-2} \pm 10^{13} \text{ m}^{-2}$) et le gain de poids est réduit de $20\% \pm 5\%$.

Le Co se ramollit à $> 900^\circ\text{C} \pm 10^\circ\text{C}$ (la dureté chute à $\text{HV} 200 \pm 30$) en raison de la formation de Co_3O_4 (pic de O 1s $530 \text{ eV} \pm 0,1 \text{ eV}$, confirmé par XPS). Le Cr_3C_2 améliore la stabilité de l'interface (énergie de l'interface $1,2 \text{ J/m}^2 \pm 0,1 \text{ J/m}^2$) par diffusion du Cr (concentration $5\% \pm 0,5\%$) et inhibe la croissance du WO_3 (épaisseur $< 0,5 \mu\text{m} \pm 0,1 \mu\text{m}$). L'analyse SEM montre que les fissures dans la couche d'oxyde (largeur $0,1 \mu\text{m} \pm 0,01 \mu\text{m}$) sont principalement réparties le long de la phase Co, et qu'il n'y a pas de fissures évidentes dans la couche de Cr_2O_3 . L'EDS vérifie l'uniformité du Cr_2O_3 (Cr:O2 : $3 \pm 0,1$), ce qui protège efficacement le substrat.

8.2.1.3 Analyse des facteurs affectant la résistance à l'oxydation du carbure cémenté

La résistance à l'oxydation du carbure cémenté à haute température ($800\text{-}1000^\circ\text{C}$) est un indicateur clé de ses performances, qui influence directement sa durée de vie dans les domaines des outils

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

aéronautiques, des moules haute température et des équipements énergétiques. La résistance à l'oxydation est généralement caractérisée par le gain de masse, l'épaisseur de la couche d'oxyde et la constante cinétique d'oxydation (k_p), laquelle est influencée par de nombreux facteurs, notamment la température, la teneur en Cr_3C_2 , la granulométrie, la teneur en Co et l'humidité ambiante. Ces facteurs déterminent conjointement la résistance à l'oxydation à haute température du carbure cimenté en modifiant la vitesse de réaction d'oxydation, les propriétés des produits d'oxydation et la stabilité de la microstructure du matériau. À partir de ces facteurs, combinés à des données expérimentales, des analyses thermodynamiques et des cas réels, nous analysons ci-dessous en détail leur influence sur la résistance à l'oxydation du carbure cimenté et son mécanisme.

(1) Effet de la température

Français le facteur le plus critique affectant la résistance à l'oxydation du carbure cimenté, qui détermine directement le comportement thermodynamique et cinétique de la réaction d'oxydation. À $1000\text{ }^{\circ}\text{C} \pm 10\text{ }^{\circ}\text{C}$, les particules de WC réagissent avec l'oxygène pour générer WO_3 ($WC + 5/2 O_2 \rightarrow WO_3 + CO_2$), et le gain de masse augmente significativement d'environ $50\% \pm 5\%$, de $0,3\text{ mg/cm}^2$ à $\pm 0,05\text{ mg/cm}^2$ jusqu'à $0,5\text{ mg/cm}^2 \pm 0,05\text{ mg/cm}^2$. Cela est dû au fait que la pression partielle d'oxygène et la vitesse de diffusion atomique augmentent significativement à haute température, et la constante de vitesse de réaction d'oxydation (k_p) augmente exponentiellement avec la température (conformément à l'équation d'Arrhenius : $k_p = A \exp(-Q/RT)$, où Q est l'énergie d'activation, R est la constante des gaz et T est la température absolue). À $< 900^{\circ}\text{C} \pm 10^{\circ}\text{C}$, le taux d'oxydation diminue significativement et le gain de masse est contrôlé à $0,3\text{ mg/cm}^2 \pm 0,05\text{ mg/cm}^2$ ou moins, ce qui indique que la diffusion de l'oxygène est limitée à des températures plus basses, la couche WO_3 croît lentement (épaisseur $< 0,5\text{ }\mu\text{m} \pm 0,1\text{ }\mu\text{m}$) et l'effet protecteur sur le matériau est plus faible mais la destructivité est également moindre.

(2) Effet de la teneur en Cr_3C_2 additif

L'ajout de carbure de chrome (Cr_3C_2) est un moyen important d'améliorer la résistance à l'oxydation du carbure cimenté. Lorsque la teneur en Cr_3C_2 est de $0,5\% \pm 0,01\%$, la constante cinétique d'oxydation (k_p) diminue d'environ $50\% \pm 5\%$, passant de $10^{-9}\text{ g}^2/\text{cm}^4 \cdot \text{s}$ à $5 \times 10^{-10}\text{ g}^2/\text{cm}^4 \cdot \text{s}$. Ceci est dû au fait que le Cr réagit avec l'oxygène à haute température pour former une couche dense de Cr_2O_3 (épaisseur d'environ $0,2\text{ }\mu\text{m} \pm 0,05\text{ }\mu\text{m}$), dont la croissance est lente (faible) k_p , bloquant efficacement la diffusion de l'oxygène et inhibant l'oxydation supplémentaire du WC et du Co. Cependant, lorsque la teneur en Cr_3C_2 dépasse $1\% \pm 0,01\%$, la proportion de phases cassantes (telles que la phase η , la phase composite WC-Co-Cr) dans le matériau augmente d'environ $10\% \pm 2\%$, ce qui entraîne une diminution de la ténacité à la rupture (K_{Ic}) d'environ $8\% \pm 12\% \pm 2\%$. La présence de phases cassantes peut induire des microfissures sous contrainte à haute température, augmenter les voies de perméation de l'oxygène et affaiblir la résistance à l'oxydation. Par conséquent, la quantité ajoutée doit être contrôlée avec précision pour équilibrer la résistance à l'oxydation et les propriétés mécaniques.

(3) Influence de la taille des grains de carbure de tungstène (WC)

Le carbure de tungstène (WC) a un effet significatif sur la résistance à l'oxydation du carbure

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

cémenté en affectant la densité des joints de grains et le chemin de diffusion de l'oxygène . Lorsque la taille des grains est de $0,51 \mu\text{m} \pm 0,01 \mu\text{m}$, le nombre de joints de grains est important, le chemin de diffusion de l'oxygène est dispersé, l'épaisseur de la couche d'oxyde est mince ($< 0,5 \mu\text{m} \pm 0,1 \mu\text{m}$) et le gain de masse est faible ($0,3 \text{ mg/cm}^2$) . $\pm 0,05 \text{ mg/cm}^2$) . Les grains fins rendent également la distribution du Co plus uniforme et réduisent la concentration d'oxydation locale. Cependant, lorsque la taille des grains augmente à $2 \mu\text{m} \pm 0,01 \mu\text{m}$, la densité des joints de grains diminue, la diffusion de l'oxygène le long du joint de grains est centralisée, l'épaisseur de la couche d'oxyde augmente à $0,8 \mu\text{m} \pm 0,1 \mu\text{m}$ et le gain de masse augmente d'environ $20 \% \pm 5 \%$ à $0,36 \text{ mg/cm}^2$. $\pm 0,05 \text{ mg/cm}^2$. La plus grande taille des grains rend l'interface WC-Co plus facilement exposée, et la génération et le pelage de WO_3 à l'interface à haute température s'intensifient, accélérant encore le processus d'oxydation.

(4) Effet de la teneur en cobalt (Co) dans la phase liante

Le comportement à l'oxydation du cobalt (Co) de la phase de liaison à haute température affecte significativement la résistance à l'oxydation et les propriétés mécaniques du carbure cémenté. Avec une teneur en Co de $10 \% \pm 1 \%$, le carbure cémenté conserve une dureté élevée ($> \text{HV } 1000 \pm 30$) à $900^\circ\text{C} \pm 10^\circ\text{C}$, la résistance à l'oxydation est relativement stable et le gain de poids est d'environ $0,3 \text{ mg/cm}^2 \pm 0,05 \text{ mg/cm}^2$. Cependant, lorsque la teneur en Co augmente à $12 \% \pm 1 \%$, le Co est oxydé en Co_3O_4 ($\text{Co} + 3/2\text{O}_2 \rightarrow \text{Co}_3\text{O}_4$) à haute température, et sa structure lâche (épaisseur d'environ $0,5 \mu\text{m} \pm 0,1 \mu\text{m}$) ne peut pas empêcher efficacement la diffusion de l'oxygène, ce qui entraîne une diminution de la dureté d'environ $30 \% \pm 5 \%$, de $\text{HV } 1200 \pm 30$ à $\text{HV } 840 \pm 30$, et une augmentation du gain de masse à $0,4 \text{ mg/cm}^2$. $\pm 0,05 \text{ mg/cm}^2$. La formation de Co_3O_4 s'accompagne également d'une expansion volumique (la densité chute de $8,9 \text{ g/cm}^3$ à $6,1 \text{ g/cm}^3$) , induisant des microfissures de surface, accélérant l'oxydation et l'écaillage, et affectant sérieusement la stabilité à haute température du matériau.

(5) Influence de l'humidité ambiante

L'humidité ambiante a également un effet significatif sur la résistance à l'oxydation du carbure cémenté. Dans des conditions d'humidité $> 50 \% \pm 5 \%$, la vapeur d'eau (H_2O) participe à la réaction d'oxydation ($\text{WC} + 5\text{H}_2\text{O} \rightarrow \text{WO}_3 + \text{CO}_2 + 5\text{H}_2$) , générant du $\text{WO}_2(\text{OH})_2$ volatil , ce qui accélère encore la croissance et le pelage de la couche de WO_3 , entraînant une augmentation du gain de masse d'environ $10 \% \pm 2 \%$, de $0,3 \text{ mg/cm}^2$ à $0,6 \text{ mg/cm}^2$. $\pm 0,05 \text{ mg/cm}^2$ jusqu'à $0,33 \text{ mg/cm}^2 \pm 0,05 \text{ mg/cm}^2$. La présence de vapeur d'eau favorise également l'oxydation du Co ($\text{Co} + \text{H}_2\text{O} + 1/2\text{O}_2 \rightarrow \text{Co}(\text{OH})_2$) . Le $\text{Co}(\text{OH})_2$ généré se décompose en Co_3O_4 à haute température, ce qui aggrave le détachement du produit d'oxydation. Dans un environnement à faible humidité ($< 30 \% \pm 5 \%$), l'oxydation est principalement entraînée par l'oxygène, la couche de WO_3 croît lentement et le gain de poids est réduit d'environ $5 \% \pm 1 \%$, montrant une meilleure résistance à l'oxydation.

(6) Interactions entre les facteurs

Les facteurs ci-dessus n'agissent pas indépendamment, mais affectent la résistance à l'oxydation par des interactions complexes. Par exemple, lorsqu'une température élevée ($1000^\circ\text{C} \pm 10^\circ\text{C}$) est associée à une teneur élevée en Co ($> 12 \% \pm 1 \%$), le gain de masse peut atteindre $0,6 \text{ mg/cm}^2 \pm$

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

0,05 mg/ cm², l'épaisseur de la couche d' oxyde augmente à 1,2 μm ± 0,1 μm , dépassant de loin l'influence d'un seul facteur. L'ajout de Cr₃C₂ (0,5 % ± 0,01 %) peut compenser partiellement l'effet négatif d'une teneur élevée en Co, mais sous une humidité élevée (> 50 % ± 5 %), la couche de Cr₂O₃ peut se rompre localement en raison de l'érosion par la vapeur d'eau. De plus, les grains fins (0,51 μm ± 0,01 μm) présentent une excellente résistance à l'oxydation à < 900°C ± 10°C, mais à 1000°C ± 10°C, la diffusion d' oxygène aux joints de grains peut encore aggraver l'oxydation locale, indiquant l'effet limitant de la température sur la protection des joints de grains.

(7) Analyse de cas complète

comme exemple des échantillons de WC-12Co et WC-10Co (Cr₃C₂ 0,5 % ± 0,01%), après exposition à 1000°C ± 10°C et à l'atmosphère d'air (humidité 50% ± 5%) pendant 100 heures, le gain de masse de WC-12Co est de 0,5 mg/ cm² ± 0,05 mg/ cm², l'épaisseur de la couche d'oxyde est de 1,1 μm ± 0,1 μm et la surface se décolle manifestement, indiquant que sa résistance à l'oxydation est faible. Français Le gain de poids du WC-10Co (Cr₃C₂0,5%±0,01%) n'est que de 0,3 mg/cm² ± 0,05 mg/cm² , l'épaisseur de la couche d'oxyde est de 0,4 μm ± 0,1 μm et la résistance à l'oxydation est améliorée d'environ 40 % ± 5 %. L'analyse par spectroscopie de photoélectrons X (XPS) montre que la teneur en Cr dans la couche Cr₂O₃ est d'environ 5 % ± 0,5 %, et sa structure dense inhibe efficacement la diffusion de l'oxygène et de la vapeur d'eau et réduit la génération de WO₃ et Co₃O₄ . Cette performance lui permet de répondre aux exigences de résistance à l'oxydation à haute température des outils d'aubes de turbines aéronautiques (température de service 900-1000°C, durée de vie > 5000 heures ± 500 heures).

(8) Dynamique de l'oxydation et importance de l'application

L'analyse dynamique de l'oxydation montre que le gain de masse du carbure cémenté à haute température présente une loi parabolique avec le temps ($\Delta W^2 = k_{pt}$), avec une vitesse d'oxydation rapide dans la phase initiale (< 10 h), puis ralentissant en raison de l'épaississement de la couche d'oxyde. Le gain de masse du WC-10Co optimisé (Cr₃C₂ 0,5% ± 0,01%) est toujours contrôlé à 0,4 mg/cm² après une exposition à long terme (1000 h) à 1000°C ± 10°C. ± 0,05 mg/cm² , montrant une excellente stabilité à haute température. Ces caractéristiques le rendent largement utilisé dans les outils aéronautiques (température de coupe 900-1000°C), les moules haute température (température de moulage 800-900°C) et les équipements énergétiques (tels que les aubes de turbines à gaz, température de service 1000°C). Grâce à une analyse systématique des facteurs d'influence, des conseils scientifiques peuvent être fournis pour l'optimisation de la résistance à l'oxydation à haute température du carbure cémenté.

La résistance à l'oxydation du carbure cémenté est influencée par de nombreux facteurs tels que la température, la teneur en Cr₃C₂ , la granulométrie, la teneur en Co et l'humidité ambiante. Une température élevée, une teneur élevée en Co, des grains grossiers et une humidité élevée intensifient l'oxydation, tandis que des quantités appropriées de Cr₃C₂ et de grains fins améliorent significativement la résistance à l'oxydation. Des études de cas complètes montrent que le gain de poids du carbure cémenté optimisé est réduit de 40 % ± 5 % et l'épaisseur de la couche d'oxyde de 50 % ± 5 %, offrant une garantie fiable pour les applications dans les domaines à haute température

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

tels que l'aviation et l'énergie.

8.2.1.4 Stratégie d'optimisation de la résistance à l'oxydation du carbure cimenté

Pour atteindre l'objectif de résistance à l'oxydation du carbure cimenté à haute température (800-1000 °C), c'est-à-dire un gain de poids $< 0,3 \text{ mg/cm}^2 \pm 0,05 \text{ mg/cm}^2$, il est nécessaire d'améliorer systématiquement sa capacité antioxydante par une optimisation complète des additifs, de la microstructure, du procédé de frittage, du traitement de surface et des spécifications d'essai. Ces mesures d'optimisation visent à former une couche protectrice dense, à réduire les voies de diffusion de l'oxygène, à améliorer la densité du matériau et la stabilité de surface, et à vérifier l'effet d'optimisation par des tests scientifiques. À partir des aspects clés ci-dessus, combinés à des données expérimentales, à des analyses thermodynamiques et à des cas d'application pratiques, les paragraphes suivants détaillent la stratégie d'optimisation et son rôle dans le contrôle du comportement à l'oxydation.

(1) Additif de carbure de chrome (Cr_3C_2)

L'ajout de carbure de chrome (Cr_3C_2) est la stratégie principale pour améliorer la résistance à l'oxydation du carbure cimenté. La quantité d'ajout recommandée est de $0,5 \% \pm 0,01 \%$. Lors du frittage et de l'utilisation à haute température, le Cr réagit avec l'oxygène pour former une couche protectrice dense de Cr_2O_3 (épaisseur d'environ $0,2\text{-}0,3 \text{ }\mu\text{m} \pm 0,05 \text{ }\mu\text{m}$). Français La couche de Cr_2O_3 a un coefficient de diffusion d'oxygène extrêmement faible ($D_{\text{O}} \approx 10^{-14} \text{ cm}^2 / \text{s}$), ce qui bloque efficacement la pénétration de l'oxygène et réduit la constante cinétique d'oxydation (k_p) d'environ $50 \% \pm 5 \%$, de $10^{-9} \text{ g}^2 / \text{cm}^4 \cdot \text{s}$ à $5 \times 10^{-10} \text{ g}^2 / \text{cm}^4 \cdot \text{s}$. La formation de la couche de Cr_2O_3 inhibe également l'oxydation du WC pour former du WO_3 lâche ($\text{WC} + 5/2\text{O}_2 \rightarrow \text{WO}_3 + \text{CO}_2$), et l'oxydation du Co pour former du Co_3O_4 ($\text{Co} + 3/2\text{O}_2 \rightarrow \text{Co}_3\text{O}_4$), réduisant ainsi considérablement le gain de poids. En prenant le WC-10Co (Cr_3C_2 $0,5 \% \pm 0,01\%$) comme exemple, après oxydation à $1000^\circ\text{C} \pm 10^\circ\text{C}$ pendant 100 heures, le gain de poids n'est que de $0,3 \text{ mg/cm}^2 \pm 0,05 \text{ mg/cm}^2$, par rapport à l'échantillon sans ajout de Cr_3C_2 (augmentation de poids de $0,5 \text{ mg/cm}^2 \pm 0,05 \text{ mg/cm}^2$) a été réduit de $40\% \pm 5\%$, vérifiant son excellent effet de protection antioxydante.

(2) Microstructure

Le contrôle de la microstructure réduit les voies de diffusion de l'oxygène et la sensibilité à l'oxydation en optimisant la taille des grains de WC et la teneur en Co. La taille de grain de WC recommandée est de $0,51 \text{ }\mu\text{m} \pm 0,01 \text{ }\mu\text{m}$ et la teneur en Co est contrôlée à $8\text{-}10 \% \pm 1 \%$. Les grains fins augmentent la densité des joints de grains, dispersent les voies de diffusion de l'oxygène, réduisent la concentration d'oxydation locale et réduisent la zone exposée de l'interface WC-Co, inhibant la formation de WO_3 à l' interface. Une faible teneur en Co (cible $< 10 \% \pm 1 \%$) réduit la tendance à l'oxydation du Co à haute température (la quantité de formation de Co_3O_4 est réduite d'environ $30 \% \pm 5 \%$), maintenant ainsi la stabilité à haute température du matériau. Prenons l'exemple du WC-10Co à microstructure optimisée. Après oxydation à $900^\circ\text{C} \pm 10^\circ\text{C}$ pendant 100 heures, l'épaisseur de la couche d'oxyde est passée de $1 \text{ }\mu\text{m} \pm 0,1 \text{ }\mu\text{m}$ à $0,4 \text{ }\mu\text{m} \pm 0,1 \text{ }\mu\text{m}$, et le gain de masse est passé de $0,4 \text{ mg/cm}^2$ à $0,6 \text{ mg/cm}^2 \pm 0,05 \text{ mg/cm}^2$ jusqu'à $0,25 \text{ mg/cm}^2 \pm 0,05 \text{ mg/cm}^2$,

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

et la résistance à l'oxydation est améliorée d'environ $37\% \pm 5\%$. De plus, les grains fins augmentent également la dureté du matériau ($> HV 1200 \pm 30$), garantissant ses propriétés mécaniques à haute température.

(3) Procédé de frittage de carbure cimenté

L'optimisation du procédé de frittage affecte directement la compacité et la résistance à l'oxydation du carbure cimenté. La température de frittage recommandée est de $1450\text{ }^{\circ}\text{C} \pm 10\text{ }^{\circ}\text{C}$. Le vide ou une atmosphère inerte (par exemple, Ar) est utilisé pour réduire l'oxydation, garantissant une densité du matériau de $99,5\% \pm 0,1\%$ et une porosité inférieure à $0,1\% \pm 0,02\%$. Les matériaux à haute densité réduisent les pores internes et les microfissures, limitent la diffusion de l'oxygène à l'intérieur du matériau et inhibent ainsi les réactions d'oxydation profonde. Un contrôle précis de la température de frittage ($1450\text{ }^{\circ}\text{C} \pm 10\text{ }^{\circ}\text{C}$) assure également une répartition uniforme du Co (écart $< 0,1\% \pm 0,02\%$), évitant ainsi l'oxydation préférentielle des zones locales riches en Co. En prenant le WC-10Co fritté optimisé ($\text{Cr}_3\text{C}_2 0,5\% \pm 0,01\%$) comme exemple, après oxydation à $1000\text{ }^{\circ}\text{C} \pm 10\text{ }^{\circ}\text{C}$ pendant 100 heures, le gain de masse est de $0,3\text{ mg/cm}^2 \pm 0,05\text{ mg/cm}^2$, l'épaisseur de la couche d'oxyde est seulement de $0,4\text{ }\mu\text{m} \pm 0,1\text{ }\mu\text{m}$, par rapport à l'échantillon non optimisé (densité $98,5\% \pm 0,1\%$, gain de poids $0,5\text{ mg/cm}^2 \pm 0,05\text{ mg/cm}^2$) a montré une stabilité antioxydante plus élevée.

(4) Traitement de surface

L'optimisation de l'état de surface est un moyen important de réduire les fissures de la couche d'oxyde et d'améliorer la résistance à l'oxydation. Il est recommandé de contrôler la rugosité de surface (R_a) à moins de $0,05\text{ }\mu\text{m} \pm 0,01\text{ }\mu\text{m}$ par polissage mécanique de précision. Ce procédé permet de réduire l'incidence des fissures de la couche d'oxyde d'environ $20\% \pm 5\%$. La faible rugosité de la surface réduit les micro-défauts (rayures et piqûres), limite la rétention d'oxygène en surface et l'apparition de réactions d'oxydation locales, et réduit la concentration de contrainte de la couche d'oxyde à haute température, évitant ainsi le décollement et la propagation des fissures. De plus, un nettoyage par ultrasons ($40\text{ kHz} \pm 1\text{ kHz}$) peut être utilisé après le polissage pour éliminer les contaminants de surface ($< 0,1\% \pm 0,02\%$) et améliorer encore l'intégrité de la surface. Prenons l'exemple du WC-10Co poli, après oxydation à $1000\text{ }^{\circ}\text{C} \pm 10\text{ }^{\circ}\text{C}$ pendant 100 heures, l'épaisseur de la couche d'oxyde a diminué de $0,6 \pm 0,1\text{ }\mu\text{m}$ à $0,4 \pm 0,1\text{ }\mu\text{m}$, et le gain de masse est passé de $0,35\text{ mg/cm}^2$ à $0,5 \pm 0,05\text{ mg/cm}^2$ jusqu'à $0,3\text{ mg/cm}^2 \pm 0,05\text{ mg/cm}^2$, la longueur des fissures de surface a diminué de $0,2\text{ mm} \pm 0,01\text{ mm}$ à $0,15\text{ mm} \pm 0,01\text{ mm}$, montrant une amélioration significative de la résistance à l'oxydation.

(5) Spécifications des tests

Afin d'évaluer et de vérifier avec précision l'effet d'optimisation des propriétés antioxydantes, il est recommandé d'effectuer un test d'oxydation à $1000\text{ }^{\circ}\text{C} \pm 10\text{ }^{\circ}\text{C}$ pendant $100\text{ heures} \pm 10\text{ heures}$. La mesure de masse utilise une balance de précision avec une précision de $\pm 0,01\text{ mg}$ pour garantir la fiabilité des données de gain de masse. Après le test, la formation de la couche protectrice de Cr_2O_3 a été vérifiée par analyse par spectroscopie de photoélectrons X (XPS). Le pic caractéristique de Cr_{2p} est situé à $577\text{ eV} \pm 0,1\text{ eV}$, indiquant que Cr existe sous la forme de Cr_2O_3 , et le pic O_{2s} (530

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

eV $\pm$ 0,1 eV) confirme davantage la composition chimique de la couche d'oxyde. De plus, la morphologie de la couche d'oxyde peut être observée en combinaison avec un microscope électronique à balayage (MEB, résolution $< 0,1 \mu\text{m} \pm 0,01 \mu\text{m}$), et l'épaisseur (cible $< 0,5 \mu\text{m} \pm 0,1 \mu\text{m}$) et la distribution des fissures (longueur cible $< 0,1 \text{mm} \pm 0,01 \text{mm}$) peuvent être mesurées. Ce protocole de test garantit une évaluation complète des performances antioxydantes et fournit une base scientifique pour la mise en œuvre de stratégies d'optimisation.

(6) Analyse complète du cas

En prenant l'échantillon WC-10Co (Cr_3C_2 0,5 % $\pm$ 0,01 %) comme exemple, après oxydation à $1000^\circ\text{C} \pm 10^\circ\text{C}$ pendant 100 heures, son gain de masse n'est que de $0,3 \text{mg/cm}^2 \pm 0,05 \text{mg/cm}^2$, épaisseur de la couche d'oxyde de $0,4 \mu\text{m} \pm 0,1 \mu\text{m}$, dureté maintenue à $> \text{HV } 1200 \pm 30$, par rapport au WC-12Co non optimisé (gain de poids de $0,5 \text{mg/cm}^2 \pm 0,05 \text{mg/cm}^2$, dureté réduite à $\text{HV } 840 \pm 30$) a amélioré la résistance à l'oxydation d'environ 40 % $\pm$ 5 %. Français L'analyse XPS a confirmé que le pic Cr 3p dans la couche Cr_2O_3 était situé à $577 \text{eV} \pm 0,1 \text{eV}$, la teneur en Cr était d'environ 5 % $\pm$ 0,5 % et sa structure dense inhibait efficacement la diffusion d'oxygène. L'observation au MEB a montré que la longueur des fissures à la surface de la couche d'oxyde était $< 0,05 \text{mm} \pm 0,01 \text{mm}$, indiquant que le traitement de surface et la microstructure optimisés ont considérablement amélioré la stabilité à haute température. Cette performance répond aux exigences des moules à haute température (température de service $900\text{-}1000^\circ\text{C}$, nombre de cycles $> 10^5$ fois $\pm 10^4$ fois), et la durée de vie est prolongée à $1,5 \times 10^5$ fois $\pm 10^4$ fois, ce qui est mieux que 8×10^4 fois $\pm 10^4$ fois des matériaux non optimisés.

(7) Dynamique de l'oxydation et importance de l'application

Français L'analyse dynamique de l'oxydation montre que le gain de poids du carbure cémenté optimisé à $1000^\circ\text{C} \pm 10^\circ\text{C}$ présente une loi parabolique au cours du temps ($\Delta W^2 = k_{\text{pt}}$), avec un taux de gain de poids rapide ($0,1 \text{mg/cm}^2 / \text{h} \pm 0,01 \text{mg/cm}^2 / \text{h}$) dans la phase initiale ($< 10 \text{h}$), puis ralentit en raison de l'épaississement de la couche de Cr_2O_3 ($< 0,01 \text{mg/cm}^2 / \text{h} \pm 0,001 \text{mg/cm}^2 / \text{h}$). Après 1000 heures d'oxydation à long terme, le gain de poids est toujours contrôlé à $0,4 \text{mg/cm}^2 \pm 0,05 \text{mg/cm}^2$, montrant une excellente stabilité à haute température. Le carbure cémenté optimisé a de larges perspectives d'application dans les outils aéronautiques (température de coupe $900\text{-}1000^\circ\text{C}$, durée de vie > 5000 heures ± 500 heures), les moules à haute température (température de moulage $800\text{-}900^\circ\text{C}$) et les équipements énergétiques (tels que les aubes de turbines à gaz, température de service 1000°C , durée de vie $> 10^4$ heures $\pm 10^3$ heures), et son coût de maintenance annuel est réduit d'environ 30% $\pm$ 5%, ce qui reflète des avantages économiques significatifs.

(8) Adaptabilité environnementale et perspectives d'avenir

Le carbure cémenté optimisé présente également une forte adaptabilité environnementale. Dans un environnement à forte humidité ($> 50\% \pm 5\%$), la couche de Cr_2O_3 peut encore inhiber efficacement l'oxydation accélérée par la vapeur d'eau (gain de masse $< 5\% \pm 1\%$) et convient aux environnements chauds et humides à haute température (tels que les turbines à gaz marines tropicales). Dans une atmosphère soufrée (SO_2), la performance anti-sulfuration de la couche de Cr_2O_3 n'augmente son gain de masse que d'environ 10 % $\pm$ 2 %, répondant ainsi aux besoins des

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

équipements énergétiques soufrés. À l'avenir, la résistance à l'oxydation pourra être encore améliorée en introduisant des revêtements multicouches (tels que Al_2O_3 / TiN , épaisseur $5\text{-}10\text{ }\mu\text{m} \pm 0,1\text{ }\mu\text{m}$) ou de nouveaux additifs (tels que TaC, VC) pour répondre à des applications à haute température plus exigeantes (telles que les aubes de turbine de moteurs d'avion, température de service 1100°C).

L'optimisation de la résistance à l'oxydation du carbure cimenté est obtenue grâce à l'ajout de Cr_3C_2 ($0,5\% \pm 0,01\%$), au contrôle de la microstructure (grain WC $0,51\text{ }\mu\text{m} \pm 0,01\text{ }\mu\text{m}$, Co $8\%\text{-}10\% \pm 1\%$), au processus de frittage ($1450^\circ\text{C} \pm 10^\circ\text{C}$, densité $> 99,5\% \pm 0,1\%$), au traitement de surface ($R_a < 0,05\text{ }\mu\text{m} \pm 0,01\text{ }\mu\text{m}$) et aux spécifications de test ($1000^\circ\text{C} \pm 10^\circ\text{C}$, vérification XPS de Cr_2O_3). Ces stratégies fonctionnent ensemble pour réduire le gain de masse à $0,3\text{ mg/cm}^2 \pm 0,05\text{ mg/cm}^2$, dureté maintenue $> \text{HV } 1200 \pm 30$, répondant aux exigences d'application dans les moules à haute température, les outils d'aviation et d'autres domaines.

8.2.1.5 Applications techniques des propriétés antioxydantes du carbure cimenté

L'optimisation de la résistance à l'oxydation a considérablement amélioré les performances du carbure cimenté dans les environnements à haute température ($800\text{-}1000^\circ\text{C}$), lui permettant de démontrer d'excellentes performances et une fiabilité optimale dans les applications d'ingénierie des secteurs de l'aéronautique, de la fabrication de moules et de l'énergie. Grâce à l'optimisation complète des additifs (tels que Cr_3C_2), de la régulation de la microstructure, du traitement de surface et du frittage, la résistance à l'oxydation du carbure cimenté a été considérablement améliorée, le gain de poids a été réduit et la stabilité de la couche d'oxyde a été renforcée, prolongeant ainsi sa durée de vie et améliorant l'efficacité du travail. À partir des trois principaux domaines d'application que sont les outils aéronautiques, les moules haute température et les composants de turbines à gaz, et en s'appuyant sur des données spécifiques, des analyses microscopiques et des cas réels, les applications techniques et les avantages en termes de performances du carbure cimenté optimisé sont analysés en détail.

(1) Outils d'aviation en carbure

Lors de la coupe à haute température, les outils aéronautiques (tels que les alliages de titane et les alliages à base de nickel) doivent résister à des environnements extrêmes de $1\text{ }000^\circ\text{C} \pm 10^\circ\text{C}$, ce qui impose des exigences extrêmement élevées en matière de résistance à l'oxydation et à l'usure des matériaux. Le carbure cimenté WC-10Co optimisé (ajouté de Cr_3C_2 $0,5\% \pm 0,01\%$, granulométrie $0,5\text{ }\mu\text{m} \pm 0,01\text{ }\mu\text{m}$) présente un gain de masse de seulement $0,3\text{ mg/cm}^2$ après oxydation à $1\text{ }000^\circ\text{C} \pm 10^\circ\text{C}$ pendant 100 heures. Français $\pm 0,05\text{ mg/cm}^2$, l'épaisseur de la couche d'oxyde WO_3 est contrôlée à $< 0,5\text{ }\mu\text{m} \pm 0,1\text{ }\mu\text{m}$, ce qui est significativement inférieur au WC-12Co non optimisé (gain de poids $0,5\text{ mg/cm}^2 \pm 0,05\text{ mg/cm}^2$, épaisseur WO_3 $1\text{ }\mu\text{m} \pm 0,1\text{ }\mu\text{m}$). La couche protectrice Cr_2O_3 (épaisseur environ $0,2\text{ }\mu\text{m} \pm 0,05\text{ }\mu\text{m}$) inhibe efficacement la diffusion d'oxygène, et les grains fins réduisent la zone d'exposition au Co ($< 10\% \pm 1\%$), maintenant la dureté ($> \text{HV } 1200 \pm 30$) et les performances de coupe. Dans les applications pratiques, la durée de vie des outils fabriqués avec ce matériau dépasse $5\text{ }000\text{ heures} \pm 500\text{ heures}$, soit environ $67\% \pm$

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

5 % de plus que les 3 000 heures $\pm$ 300 heures non optimisées. Dans l'usinage des aubes de moteurs d'avion, l'optimisation de la résistance à l'oxydation et à l'usure de l'outil réduit le taux d'usure d'environ 40 % $\pm$ 5 %, améliorant ainsi considérablement l'efficacité de la production et la qualité des composants.

(2) Moule haute température en alliage dur

Les moules à haute température (tels que les moules de forgeage à chaud et les moules de moulage sous pression) doivent résister à des cycles thermiques répétés et à des contraintes mécaniques dans des conditions de travail de 900 °C $\pm$ 10 °C, et ont des exigences extrêmement élevées en matière de résistance à l'oxydation et de stabilité de la dureté du matériau. Après que le carbure cémenté WC-8Co optimisé (rugosité de surface $R_a < 0,05 \mu\text{m} \pm 0,01 \mu\text{m}$) est oxydé à 900°C $\pm$ 10°C pendant 100 heures, le gain de poids n'est que de 0,2 mg/cm² $\pm$ 0,05 mg/cm², épaisseur de la couche d'oxyde $< 0,4 \mu\text{m} \pm 0,1 \mu\text{m}$, dureté maintenue à $> \text{HV } 1300 \pm 30$, meilleur que le WC-10Co non optimisé (gain de poids 0,4 mg/cm² $\pm$ 0,05 mg/cm², dureté réduite à $\text{HV } 1000 \pm 30$). Français La surface à faible rugosité réduit les fissures de la couche d'oxyde (longueur $< 0,1 \text{ mm} \pm 0,01 \text{ mm}$), et combinée à une faible teneur en Co (8 % $\pm$ 1 %) et à un frittage optimisé (densité $> 99,5 \% \pm 0,1 \%$), inhibe efficacement le ramollissement du Co et le pelage du WO₃. Dans les applications pratiques, le cycle de service des moules haute température fabriqués dans ce matériau dépasse 10^5 fois $\pm 10^4$ fois, ce qui est environ 60 % $\pm$ 5 % supérieur aux 6×10^4 fois $\pm 10^4$ fois non optimisés. Dans le forgeage à chaud de pièces automobiles, l'optimisation de la résistance à l'oxydation du moule prolonge la durée de vie d'environ 50 % $\pm$ 5 %, réduisant ainsi la fréquence de remplacement et les temps d'arrêt de production.

(3) Composants de turbine à gaz en carbure cémenté

Les composants des turbines à gaz (tels que les aubes et les revêtements de chambre de combustion) doivent fonctionner longtemps dans un environnement d'oxydation à haute température (950 °C $\pm$ 10 °C), ce qui impose des exigences extrêmement élevées en matière de résistance à l'oxydation et d'intégrité structurelle du matériau. Le carbure cémenté WC-10Co optimisé (ajouté de Cr₃C₂ 0,5 % $\pm$ 0,01 %) présente un gain de masse de seulement 0,25 mg/cm² après oxydation à 950 °C $\pm$ 10 °C pendant 100 heures. $\pm 0,05 \text{ mg/cm}^2$, longueur de fissure de la couche d'oxyde $< 0,1 \mu\text{m} \pm 0,01 \mu\text{m}$, bien inférieure à celle du WC-12Co non optimisé (gain de poids 0,45 mg/cm² $\pm$ 0,05 mg/cm², longueur de fissure $0,2 \mu\text{m} \pm 0,01 \mu\text{m}$). La couche de Cr₂O₃ (teneur en Cr d'environ 5 % $\pm$ 0,5 %) et les grains fins ($0,5 \mu\text{m} \pm 0,01 \mu\text{m}$) agissent ensemble pour inhiber la formation de WO₃ et Co₃O₄, maintenant la résistance ($> 2000 \text{ MPa} \pm 100 \text{ MPa}$) et la stabilité du matériau. Dans les applications pratiques, la durée de vie des composants de turbines à gaz fabriqués avec ce matériau dépasse 10^4 heures $\pm 10^3$ heures, répondant ainsi aux exigences de fonctionnement à long terme des équipements énergétiques (tels que les turbines à gaz industrielles), ce qui est supérieur aux 6×10^3 heures $\pm 10^3$ heures non optimisées. Dans les centrales électriques, la résistance optimisée à l'oxydation des composants réduit le taux de corrosion à chaud d'environ 45 % $\pm$ 5 %, améliorant ainsi l'efficacité opérationnelle des équipements et réduisant les coûts de maintenance.

(4) Valeur technique de l'optimisation des propriétés antioxydantes

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

de carbure cémenté dans des environnements à haute température. Français En ajoutant Cr_3C_2 ($0,5 \% \pm 0,01 \%$), contrôle de la microstructure (grain $0,5 \mu\text{m} \pm 0,01 \mu\text{m}$, Co $8\%-10\% \pm 1 \%$), traitement de surface ($R_a < 0,05 \mu\text{m} \pm 0,01 \mu\text{m}$) et amélioration du processus de frittage ($1450^\circ\text{C} \pm 10^\circ\text{C}$, densité $> 99,5\% \pm 0,1 \%$), le gain de masse du carbure cémenté est passé de $0,4-0,5 \text{ mg/cm}^2$ à $\pm 0,05 \text{ mg/cm}^2$ jusqu'à $0,2-0,3 \text{ mg/cm}^2 \pm 0,05 \text{ mg/cm}^2$, épaisseur de la couche d'oxyde réduite de $40\%-50\% \pm 5\%$ et dureté maintenue à $> \text{HV } 1200 \pm 30$. Cette amélioration des performances prolonge non seulement la durée de vie (par exemple, pour les outils aéronautiques $> 5\,000$ heures ± 500 heures, les moules haute température $> 10^5$ fois $\pm 10^4$ fois, les composants de turbine à gaz $> 10^4$ heures $\pm 10^3$ heures), mais réduit également la fréquence de maintenance et les coûts de remplacement. Par exemple, le coût annuel de maintenance des outils aéronautiques est réduit d'environ $35 \% \pm 5 \%$, le cycle de remplacement des moules haute température est prolongé de $50 \% \pm 5 \%$ et l'efficacité opérationnelle des composants de turbine à gaz est améliorée d'environ $20 \% \pm 3 \%$, reflétant les avantages économiques optimisés.

(5) Adaptabilité environnementale et expansion des applications

Le carbure cémenté optimisé présente une forte adaptabilité environnementale, lui permettant de faire face à des conditions d'oxydation thermique plus complexes. Par exemple, dans un environnement à haute température contenant de la vapeur d'eau (humidité $> 50 \% \pm 5 \%$, $1\,000^\circ\text{C} \pm 10^\circ\text{C}$), la couche de Cr_2O_3 permet de contrôler le gain de masse à $0,35 \text{ mg/cm}^2 \pm 0,05 \text{ mg/cm}^2$, ce qui convient aux environnements chauds et humides des moteurs aérospatiaux. Dans une atmosphère de soufre (SO_2), les performances anti-sulfuration optimisées de l'échantillon n'augmentent son gain de masse que d'environ $10 \% \pm 2 \%$, répondant ainsi aux exigences de fonctionnement des équipements énergétiques contenant du soufre. De plus, dans des conditions extrêmes de températures plus élevées ($1100^\circ\text{C} \pm 10^\circ\text{C}$), combiné à des revêtements multicouches (tels que $\text{Al}_2\text{O}_3 / \text{TiN}$, épaisseur $5-10 \mu\text{m} \pm 0,1 \mu\text{m}$), il est possible de réduire encore le gain de poids à $0,25 \text{ mg/cm}^2 \pm 0,05 \text{ mg/cm}^2$, élargissant ainsi son potentiel d'application dans les moteurs aérospatiaux de nouvelle génération et les fours industriels.

(6) Cas complets et perspectives d'avenir

En prenant WC-10Co ($\text{Cr}_3\text{C}_2 0,5 \% \pm 0,01 \%$, $R_a < 0,05 \mu\text{m} \pm 0,01 \mu\text{m}$) comme exemple, après oxydation à $1000^\circ\text{C} \pm 10^\circ\text{C}$ pendant 100 heures, le gain de masse est de $0,3 \text{ mg/cm}^2 \pm 0,05 \text{ mg/cm}^2$, épaisseur $\text{WO}_3 < 0,5 \mu\text{m} \pm 0,1 \mu\text{m}$; dureté $> \text{HV } 1300 \pm 30$ à $900^\circ\text{C} \pm 10^\circ\text{C}$, cycles de service $> 10^5$ fois $\pm 10^4$ fois; fissure de la couche d'oxyde $< 0,1 \mu\text{m} \pm 0,01 \mu\text{m}$ à $950^\circ\text{C} \pm 10^\circ\text{C}$, durée de vie $> 10^4$ heures $\pm 10^3$ heures. Ces données montrent que le carbure cémenté optimisé présente une excellente résistance à l'oxydation et une stabilité à long terme dans les outils aéronautiques, les moules à haute température et les composants de turbines à gaz, avec une durée de vie augmentée de $67 \% \pm 5 \%$, $60 \% \pm 5 \%$ et $67 \% \pm 5 \%$ respectivement. À l'avenir, la résistance à l'oxydation du matériau dans des environnements à très haute température ($> 1100^\circ\text{C}$) pourra être encore améliorée par l'introduction de nouveaux additifs (tels que TaC, VC) ou le développement de revêtements à gradient fonctionnel pour répondre aux besoins de la prochaine génération d'équipements aérospatiaux et énergétiques.

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

(7) Performance dynamique et avantages économiques

Français Les tests d'oxydation dynamique montrent que le gain de poids du carbure cémenté optimisé à $1000^{\circ}\text{C} \pm 10^{\circ}\text{C}$ suit une tendance parabolique au fil du temps ($\Delta W^2 = k_{\text{pt}}$), avec un taux de gain de poids initial d'environ $0,1 \text{ mg/cm}^2/\text{h} \pm 0,01 \text{ mg/cm}^2/\text{h}$ ($< 10 \text{ h}$), qui ralentit ensuite à $< 0,01 \text{ mg/cm}^2/\text{h} \pm 0,001 \text{ mg/cm}^2/\text{h}$ en raison de l'épaississement de la couche de Cr_2O_3 . Après 1000 heures d'exposition à long terme, le gain de poids est toujours contrôlé à $0,4 \text{ mg/cm}^2 \pm 0,05 \text{ mg/cm}^2$, vérifiant sa stabilité dans un environnement d'oxydation thermique dynamique. Cette amélioration des performances prolonge non seulement la durée de vie de l'équipement, mais réduit également considérablement les coûts d'exploitation. Par exemple, le coût annuel de maintenance des outils aéronautiques est réduit d'environ $35 \% \pm 5 \%$, le cycle de remplacement des moules à haute température est prolongé de $50 \% \pm 5 \%$ et l'efficacité de fonctionnement des composants des turbines à gaz est améliorée d'environ $20 \% \pm 3 \%$, ce qui reflète la valeur économique de l'optimisation.

Français L'optimisation de la résistance à l'oxydation améliore considérablement la fiabilité du carbure cémenté dans les environnements à haute température. Des formulations optimisées telles que WC-10Co et WC-8Co ont montré un bon gain de masse ($0,2\text{-}0,3 \text{ mg/cm}^2$) dans les outils aérospatiaux, les moules à haute température et les composants de turbines à gaz. ($\pm 0,05 \text{ mg/cm}^2$), l'épaisseur de la couche d'oxyde ($< 0,5 \mu\text{m} \pm 0,1 \mu\text{m}$) et la durée de vie ($> 5000 \text{ heures} \pm 500 \text{ heures}$, $> 10^5 \text{ fois} \pm 10^4 \text{ fois}$, $> 10^4 \text{ heures} \pm 10^3 \text{ heures}$) sont toutes meilleures que les matériaux traditionnels. Ces cas d'application prouvent pleinement que l'optimisation de la résistance à l'oxydation est une stratégie clé pour améliorer la fiabilité et les avantages économiques du carbure cémenté dans les applications d'ingénierie à haute température.

8.2.2 Fatigue thermique et fluage du carbure cémenté

8.2.2.1 Aperçu des principes et des technologies de fatigue thermique et de fluage du carbure cémenté

Français La fatigue thermique et le comportement au fluage du carbure cémenté dans un environnement à haute température ($800\text{-}1000^{\circ}\text{C}$) sont des facteurs limitants importants pour ses performances de service, affectant directement sa fiabilité dans des applications exigeantes telles que les turbines d'aviation (durée de vie $> 5000 \text{ heures} \pm 500 \text{ heures}$) et les moules à haute température (nombre de cycles $> 10^5 \text{ fois} \pm 10^4 \text{ fois}$). La fatigue thermique fait référence au processus d'initiation et de propagation de microfissures causé par une contrainte thermique cyclique ($> 500 \text{ MPa} \pm 50 \text{ MPa}$) causée par la différence de coefficient de dilatation thermique ($5,2 \times 10^{-6} \text{ K}^{-1}$ et $13 \times 10^{-6} \text{ K}^{-1}$ pour WC et Co respectivement) lors de cycles répétés à haute température-basse température ($\Delta T 500^{\circ}\text{C} \pm 10^{\circ}\text{C}$). Français La longueur d'extension de fissure doit être contrôlée à $< 0,1 \text{ mm} \pm 0,01 \text{ mm}$ pour garantir la fiabilité. Le fluage est la déformation plastique lente et irréversible d'un matériau sous haute température ($> 800^{\circ}\text{C} \pm 10^{\circ}\text{C}$) et charge continue ($> 100 \text{ MPa} \pm 10 \text{ MPa}$) au cours du temps, avec une vitesse de déformation de $< 10^{-6} \text{ s}^{-1} \pm 10^{-7} \text{ s}^{-1}$ pour éviter la rupture. La fatigue thermique est principalement causée par la concentration de contraintes thermiques à l'interface WC-Co, tandis que le fluage est intensifié par la déformation

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

plastique causée par le ramollissement de la phase Co à haute température (la dureté chute à HV 200 ± 30) et le glissement des joints de grains. Pour améliorer les performances, la stabilité à haute température du carbure cimenté doit être optimisée en augmentant la conductivité thermique (cible $> 80 \text{ W/m}\cdot\text{K} \pm 5 \text{ W/m}\cdot\text{K}$), en améliorant la résistance aux joints de grains (cible $> 200 \text{ MPa} \pm 20 \text{ MPa}$) et en améliorant la résistance au fluage.

8.2.2.2 Mécanisme de fatigue thermique et de fluage et analyse du carbure cimenté

La fatigue thermique et le fluage du carbure cimenté dans des environnements à haute température ($800-1000^\circ\text{C} \pm 10^\circ\text{C}$) sont les principaux modes de défaillance dans des conditions de travail difficiles telles que l'aéronautique, les moules et les équipements énergétiques. La fatigue thermique se manifeste par l'initiation et la propagation de fissures causées par des contraintes thermiques cycliques, tandis que le fluage se manifeste par une déformation plastique sous charge continue à haute température. Une compréhension approfondie de ces deux mécanismes de défaillance est essentielle pour optimiser les performances à haute température du carbure cimenté. À partir des mécanismes de fatigue thermique et de fluage, combinés à la mécanique de la rupture, à la thermodynamique, à la microanalyse et aux données expérimentales, le processus de défaillance, les facteurs d'influence et les effets d'optimisation sont systématiquement abordés.

(1) Mécanisme et analyse de la fatigue thermique

La fatigue thermique est un mode de défaillance du carbure cimenté causé par une contrainte thermique ($> 500 \text{ MPa} \pm 50 \text{ MPa}$) lors de cycles haute température-basse température (ΔT $500^\circ\text{C} \pm 10^\circ\text{C}$). La contrainte thermique provient de la différence de coefficients de dilatation thermique entre les phases WC et Co ($5,2 \times 10^{-6} \text{ K}^{-1}$ pour WC et $13 \times 10^{-6} \text{ K}^{-1}$ pour Co). $\sigma = E \cdot \Delta \alpha \cdot \Delta T$. Le module d'élasticité du carbure cimenté ($E \approx 600 \text{ GPa} \pm 50 \text{ GPa}$) et la différence de température ($\Delta T = 500^\circ\text{C} \pm 10^\circ\text{C}$) peuvent être calculés par la formule. La contrainte thermique peut atteindre $500-600 \text{ MPa} \pm 50 \text{ MPa}$, ce qui dépasse de loin la force de liaison de l'interface WC-Co (environ $300 \text{ MPa} \pm 30 \text{ MPa}$), entraînant l'initiation de fissures à l'interface.

La croissance des fissures de fatigue thermique suit la loi de Paris :

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

Où da/dN est la vitesse de croissance des fissures (mm/cycle), ΔK est l'amplitude du facteur d'intensité de contrainte ($< 20 \text{ MPa}\cdot\text{m}^{1/2} \pm 1 \text{ MPa}\cdot\text{m}^{1/2}$), C est la constante du matériau ($10^{-10} \pm 10^{-11}$) et m est l'indice de croissance des fissures ($3,5 \pm 0,1$). Français Pour le WC-10Co, le taux de croissance des fissures non optimisé est d'environ $2 \times 10^{-7} \text{ mm/cycle} \pm 10^{-8} \text{ mm/cycle}$, tandis qu'une fois la taille des grains optimisée à $0,5 \mu\text{m} \pm 0,01 \mu\text{m}$, le taux de croissance des fissures chute à $< 10^{-7} \text{ mm/cycle} \pm 10^{-8} \text{ mm/cycle}$, soit une diminution d'environ $50\% \pm 5\%$. Les grains fins augmentent la densité des joints de grains, entravent la croissance des fissures et les fissures se déforment aux joints de grains (angle de déflexion $30^\circ \pm 5^\circ$), ce qui allonge le chemin de la fissure et réduit le facteur de concentration des contraintes (K_t passe de $2,5 \pm 0,1$ à $< 2 \pm 0,1$). De plus, une teneur en Co de $10\% \pm 1\%$ provoque une légère déformation plastique (déformation $0,1\% \pm 0,01\%$) à $> 800^\circ\text{C} \pm 10^\circ\text{C}$, ce qui soulage partiellement la concentration de contrainte thermique et ralentit l'initiation des fissures.

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

L'ajout de Cr_3C_2 ($0,5 \% \pm 0,01 \%$) améliore encore la résistance à la fatigue thermique. Cr_3C_2 forme une couche de Cr_2O_3 (épaisseur $0,2 \mu\text{m} \pm 0,05 \mu\text{m}$) à haute température, tout en améliorant la résistance aux joints de grains (de $180 \text{ MPa} \pm 20 \text{ MPa}$ à $> 200 \text{ MPa} \pm 20 \text{ MPa}$), réduisant le taux de croissance des fissures d'environ $40 \% \pm 5 \%$, de $2 \times 10^{-7} \text{ mm/cycle} \pm 10^{-8} \text{ mm/cycle}$ à $1,2 \times 10^{-7} \text{ mm/cycle} \pm 10^{-8} \text{ mm/cycle}$. Français Les observations par microscopie électronique à balayage (MEB, résolution $< 0,1 \mu\text{m} \pm 0,01 \mu\text{m}$) ont montré que les fissures de fatigue thermique étaient principalement des fractures intergranulaires avec une largeur de fissure d'environ $0,1 \mu\text{m} \pm 0,01 \mu\text{m}$. Les fissures dans les échantillons non optimisés s'étendaient le long de l'interface WC-Co. Après l'ajout de Cr_3C_2 , la déflexion de la fissure est devenue plus évidente et le chemin de la fissure a été prolongé d'environ $30 \% \pm 5 \%$, indiquant que le renforcement des joints de grains a efficacement inhibé la propagation des fissures.

(2) Mécanisme et analyse du fluage

Le fluage est le principal mode de défaillance du carbure cimenté à haute température ($1000^\circ\text{C} \pm 10^\circ\text{C}$) et sous charge soutenue ($100 \text{ MPa} \pm 10 \text{ MPa}$), et sa vitesse de déformation est décrite par l'équation de Norton :

$$\dot{\epsilon} = A \cdot \sigma^n \cdot \exp\left(-\frac{Q}{RT}\right)$$

Français Où $\dot{\epsilon}$ est la vitesse de déformation de fluage à l'état stationnaire (s^{-1}), A est la constante du matériau, σ est la contrainte ($100 \text{ MPa} \pm 10 \text{ MPa}$), n est l'exposant de contrainte ($3 \pm 0,1$), Q est l'énergie d'activation ($300 \text{ kJ/mol} \pm 10 \text{ kJ/mol}$), R est la constante des gaz ($8,314 \text{ J/mol} \cdot \text{K}$) et T est la température absolue (1273 K). Pour WC-10Co, la vitesse de déformation non optimisée est de $10^{-6} \text{ s}^{-1} \pm 10^{-7} \text{ s}^{-1}$ à $1000^\circ\text{C} \pm 10^\circ\text{C}$, qui est principalement due au ramollissement de la phase Co et au glissement des joints de grains. La dureté du Co chute à $\text{HV } 200 \pm 30$ à $> 800^\circ\text{C} \pm 10^\circ\text{C}$, accompagnée d'un glissement des joints de grains et d'une diffusion de lacunes, entraînant une accumulation de déformation plastique.

Français L'ajout de Cr_3C_2 ($0,5 \% \pm 0,01 \%$) améliore significativement la résistance au fluage. Cr_3C_2 réduit l'énergie d'activation Q à $250 \text{ kJ/mol} \pm 10 \text{ kJ/mol}$ et réduit la vitesse de déformation au fluage d'environ $40 \% \pm 5 \%$, de $10^{-6} \text{ s}^{-1} \pm 10^{-7} \text{ s}^{-1}$ à $6 \times 10^{-7} \text{ s}^{-1} \pm 10^{-7} \text{ s}^{-1}$. Français Le Cr_3C_2 améliore la capacité antidérapante des joints de grains grâce au renforcement de la solution solide et à l'ancrage des joints de grains (la résistance des joints de grains augmente de $180 \text{ MPa} \pm 20 \text{ MPa}$ à $> 200 \text{ MPa} \pm 20 \text{ MPa}$), tout en réduisant le ramollissement à haute température de la phase Co. L'analyse SEM montre que la largeur de la bande de glissement de la phase Co pendant le fluage est d'environ $0,5 \mu\text{m} \pm 0,1 \mu\text{m}$. La bande de glissement de l'échantillon non optimisé est distribuée en continu le long du joint de grains. Après l'ajout de Cr_3C_2 , la distribution de la bande de glissement est plus dispersée et la largeur est réduite à $0,3 \mu\text{m} \pm 0,1 \mu\text{m}$, indiquant que le Cr_3C_2 inhibe efficacement le glissement des joints de grains.

(3) Analyse et vérification microscopiques

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

Français La spectroscopie dispersive en énergie (EDS) a en outre vérifié l'effet de renforcement de Cr_3C_2 . La teneur en Cr au joint de grain est d'environ $5\% \pm 0,5\%$, qui est uniformément répartie à l'interface WC-Co, formant une zone riche en Cr, ce qui améliore les capacités antidérapantes et anti-propagation des fissures de l'interface. L'analyse par spectroscopie de photoélectrons X (XPS) montre que le pic caractéristique de Cr3p est situé à $577\text{ eV} \pm 0,1\text{ eV}$, confirmant la présence de Cr_2O_3 , ce qui améliore encore la résistance à l'oxydation du joint de grain à haute température, soutenant indirectement la fatigue thermique et la résistance au fluage. Les images SEM montrent également que les fissures de fatigue thermique des échantillons non optimisés s'étendent en ligne droite le long de la limite des grains, tandis que le chemin de la fissure après optimisation est plus tortueux et l'angle de déviation augmente de $20^\circ \pm 5^\circ$ à $30^\circ \pm 5^\circ$, vérifiant l'amélioration de la barrière de limite de grains.

Français Prenons l'exemple du WC-10Co ($\text{Cr}_3\text{C}_2 0,5\% \pm 0,01\%$), dans l'essai de choc thermique ($1\,000\text{ }^\circ\text{C} \pm 10\text{ }^\circ\text{C}$ à $25\text{ }^\circ\text{C} \pm 1\text{ }^\circ\text{C}$, 500 fois ± 50 fois), la longueur de fissure est de $0,03\text{ mm} \pm 0,01\text{ mm}$ et la vitesse de croissance de fissure est $< 10^{-7}\text{ mm/cycle} \pm 10^{-8}\text{ mm/cycle}$, ce qui est $40\% \pm 5\%$ inférieur à la valeur non optimisée de $0,05\text{ mm} \pm 0,01\text{ mm}$. Dans l'essai de fluage ($1\,000\text{ }^\circ\text{C} \pm 10\text{ }^\circ\text{C}$, $100\text{ MPa} \pm 10\text{ MPa}$, 100 heures), la vitesse de déformation est de $6 \times 10^{-7}\text{ s}^{-1} \pm 10^{-7}\text{ s}^{-1}$, contre 10^{-6} s^{-1} sans optimisation $\pm 10^{-7}\text{ s}^{-1}$, soit une réduction de $40\% \pm 5\%$. Ces améliorations lui permettent d'exceller dans les outils d'usinage d'aubes de turbines aéronautiques (durée de vie $> 5\,000\text{ heures} \pm 500\text{ heures}$) et les moules haute température (service $> 1,5 \times 10^5\text{ fois} \pm 10^4\text{ fois}$).

Français Les mécanismes de fatigue thermique et de fluage du carbure cémenté sont principalement l'extension des fissures et le glissement de phase Co, respectivement. L'extension des fissures de fatigue thermique suit la loi de Paris. Les grains fins ($0,5\text{ }\mu\text{m} \pm 0,01\text{ }\mu\text{m}$) et Cr_3C_2 ($0,5\% \pm 0,01\%$) réduisent le taux de croissance des fissures de $40\% \pm 5\%$ par l'encombrement et le renforcement des joints de grains. La vitesse de déformation par fluage est contrôlée par l'équation de Norton. Cr_3C_2 réduit l'énergie d'activation et le glissement des joints de grains, et la vitesse de déformation chute de $40\% \pm 5\%$. Les analyses SEM et EDS ont confirmé le rôle du renforcement des joints de grains et de l'inhibition du glissement, fournissant un support théorique pour l'optimisation des performances à haute température.

8.2.2.3 Facteurs affectant la fatigue thermique et le fluage du carbure cémenté et leurs effets de couplage

Le comportement en fatigue thermique et en fluage du carbure cémenté dans un environnement à haute température ($800\text{-}1000\text{ }^\circ\text{C} \pm 10\text{ }^\circ\text{C}$) est influencé par le couplage de multiples facteurs, notamment la taille des grains, la teneur en Co, l'ajout de Cr_3C_2 , la différence de température et la conductivité thermique. Ces facteurs déterminent conjointement la vitesse de propagation des fissures et la vitesse de déformation par fluage en modifiant la distribution des contraintes thermiques, la résistance aux joints de grains, la plastification du matériau et la vitesse de diffusion de l'oxygène. La compréhension des effets individuels de ces facteurs et de leurs effets de couplage mutuel est essentielle pour optimiser les performances à haute température du carbure cémenté. À partir de ces facteurs clés, combinés à la mécanique de la rupture, à la thermodynamique et aux

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

données expérimentales, l'analyse détaillée suivante de leur mécanisme d'influence et de la direction d'optimisation est présentée.

(1) Effet de la granulométrie

La taille des grains a un effet significatif sur les propriétés de fatigue thermique et de fluage en affectant la densité des joints de grains et le chemin de propagation des fissures. Lorsque la taille des grains de WC est de $0,51 \mu\text{m} \pm 0,01 \mu\text{m}$, le nombre de joints de grains augmente, la longueur des fissures de fatigue thermique est considérablement réduite ($< 0,05 \text{ mm} \pm 0,01 \text{ mm}$) et la vitesse de croissance des fissures (da/dN) diminue de $2 \times 10^{-7} \text{ mm/cycle} \pm 10^{-8} \text{ mm/cycle}$ à $< 10^{-7} \text{ mm/cycle} \pm 10^{-8} \text{ mm/cycle}$, soit une diminution d'environ $50 \% \pm 5 \%$. Français Les grains fins provoquent la déflexion des fissures aux joints de grains (angle de déflexion $30^\circ \pm 5^\circ$), prolongent le chemin de la fissure et réduisent le facteur d'intensité de contrainte (ΔK de $20 \text{ MPa} \cdot \text{m}^{1/2} \pm 1 \text{ MPa} \cdot \text{m}^{1/2}$ jusqu'à $15 \text{ MPa} \cdot \text{m}^{1/2} \pm 1 \text{ MPa} \cdot \text{m}^{1/2}$). En même temps, l'augmentation de la densité des joints de grains disperse la contrainte de fluage et la vitesse de déformation de fluage ($\dot{\epsilon}$) diminue de $1,5 \times 10^{-6} \text{ s}^{-1} \pm 10^{-7} \text{ s}^{-1}$ à $< 10^{-6} \text{ s}^{-1} \pm 10^{-7} \text{ s}^{-1}$. Français Cependant, à $> 1000^\circ\text{C} \pm 10^\circ\text{C}$, les grains fins peuvent légèrement augmenter la vitesse de fluage (environ $10\% \pm 2\%$) en raison de la diffusion accrue des joints de grains (le coefficient de diffusion D augmente d'environ $20\% \pm 3\%$), indiquant que la stabilité des joints de grains à haute température doit être davantage optimisée. En revanche, lorsque la taille des grains augmente à $2 \mu\text{m} \pm 0,01 \mu\text{m}$, la densité des joints de grains diminue, la fissure se propage le long de moins de joints de grains, la longueur de la fissure augmente d'environ $30\% \pm 5\%$ à $0,065 \text{ mm} \pm 0,01 \text{ mm}$, et la vitesse de déformation de fluage augmente également à $2 \times 10^{-6} \text{ s}^{-1} \pm 10^{-7} \text{ s}^{-1}$.

(2) Effet de la teneur en Co

La teneur en Co dans la phase de liaison affecte directement la capacité de déformation plastique et la stabilité à haute température du carbure cémenté. Lorsque la teneur en Co est de $10 \% \pm 1 \%$, le Co soulage la concentration de contrainte thermique (facteur de concentration de contrainte $K_t < 2 \pm 0,1$) par déformation microplastique (déformation $0,1 \% \pm 0,01 \%$) pendant la fatigue thermique, et la vitesse de propagation des fissures reste faible ($< 10^{-7} \text{ mm/cycle} \pm 10^{-8} \text{ mm/cycle}$), et la vitesse de déformation au fluage est contrôlée à $< 10^{-6} \text{ s}^{-1} \pm 10^{-7} \text{ s}^{-1}$. Cependant, lorsque la teneur en Co augmente à $12 \% \pm 1 \%$, le ramollissement du Co à $> 800^\circ\text{C} \pm 10^\circ\text{C}$ s'intensifie (la dureté diminue de $\text{HV } 600 \pm 30$ à $\text{HV } 200 \pm 30$), et le glissement des joints de grains est considérablement amélioré, ce qui entraîne une augmentation d'environ $50 \% \pm 5 \%$ de la vitesse de déformation par fluage à $1,5 \times 10^{-6} \text{ s}^{-1} \pm 10^{-7} \text{ s}^{-1}$. Dans le même temps, bien que la capacité de déformation plastique du Co puisse encore soulager les contraintes lors de la fatigue thermique, la teneur excessive en Co réduit la force de liaison de l'interface WC-Co (de $300 \text{ MPa} \pm 30 \text{ MPa}$ à $250 \text{ MPa} \pm 30 \text{ MPa}$), et la fissure est plus susceptible de s'étendre le long de l'interface, et la longueur de la fissure augmente de $0,05 \text{ mm} \pm 0,01 \text{ mm}$ à $0,07 \text{ mm} \pm 0,01 \text{ mm}$. L'optimisation de la teneur en Co nécessite un équilibre entre la résistance à la fatigue thermique et la résistance au fluage.

(3) Effet de l'ajout de Cr_3C_2

L'ajout de Cr_3C_2 est un moyen efficace d'améliorer la résistance à la fatigue thermique et au fluage.

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

Lorsque la teneur en Cr_3C_2 est de $0,5 \% \pm 0,01 \%$, le Cr se dissout dans la phase Co à haute température et forme une couche de Cr_2O_3 (épaisseur $0,2 \mu\text{m} \pm 0,05 \mu\text{m}$), ce qui améliore considérablement la résistance aux joints de grains (de $180 \text{ MPa} \pm 20 \text{ MPa}$ à $> 200 \text{ MPa} \pm 20 \text{ MPa}$), et la longueur des fissures de fatigue thermique est réduite d'environ $40 \% \pm 5 \%$, de $0,05 \text{ mm} \pm 0,01 \text{ mm}$ à $0,03 \text{ mm} \pm 0,01 \text{ mm}$, et la vitesse de croissance des fissures est réduite de $2 \times 10^{-7} \text{ mm/cycle}$ à $1,2 \times 10^{-7} \text{ mm/cycle}$. Cr_3C_2 inhibe également le glissement de la phase Co par blocage des joints de grains, et la vitesse de déformation par fluage est réduite d'environ $40 \% \pm 5 \%$, de $10^{-6} \text{ s}^{-1} \pm 10^{-7} \text{ s}^{-1}$ à $6 \times 10^{-7} \text{ s}^{-1} \pm 10^{-7} \text{ s}^{-1}$. Cependant, lorsque la teneur en Cr_3C_2 dépasse $1 \% \pm 0,01 \%$, la proportion de phases cassantes (telles que la phase η , la phase composite WC-Co-Cr) augmente d'environ $10 \% \pm 2 \%$, ce qui entraîne une diminution de la ténacité à la rupture (K_{Ic}) d'environ $10 \% \pm 2 \%$, de $12 \text{ MPa} \cdot \text{m}^{1/2}$ à $20 \text{ MPa} \cdot \text{m}^{1/2}$. $\pm 1 \text{ MPa} \cdot \text{m}^{1/2}$ jusqu'à $10,8 \text{ MPa} \cdot \text{m}^{1/2} \pm 1 \text{ MPa} \cdot \text{m}^{1/2}$. La présence de phase cassante facilite la propagation des fissures le long de l'interface, affaiblissant la résistance à la fatigue thermique. La quantité d'ajout doit être contrôlée avec précision.

(4) Impact de la différence de température

La différence de température du cycle thermique (ΔT) est le principal facteur déterminant de la fatigue thermique. Lorsque $\Delta T > 500^\circ\text{C} \pm 10^\circ\text{C}$, la contrainte thermique ($\sigma = E \cdot \Delta\alpha \cdot \Delta T$) augmente significativement et la longueur de la fissure augmente d'environ $50 \% \pm 5 \%$, passant de $0,05 \text{ mm} \pm 0,01 \text{ mm}$ à $0,075 \text{ mm} \pm 0,01 \text{ mm}$. Prenons l'exemple de $\Delta T 600^\circ\text{C} \pm 10^\circ\text{C}$, la contrainte thermique peut atteindre $600 \text{ MPa} \pm 50 \text{ MPa}$, et le taux de propagation des fissures augmente de 10^{-7} mm/cycle à $1,5 \times 10^{-7} \text{ mm/cycle}$. Au contraire, lorsque $\Delta T < 300^\circ\text{C} \pm 10^\circ\text{C}$, la contrainte thermique chute à $300 \text{ MPa} \pm 30 \text{ MPa}$, et la longueur de fissure est contrôlée à $< 0,03 \text{ mm} \pm 0,01 \text{ mm}$, ce qui indique que la différence de température plus faible ralentit considérablement la rupture par fatigue thermique. La différence de température a peu d'effet sur le fluage, mais si la phase de température élevée ($> 1000^\circ\text{C} \pm 10^\circ\text{C}$) dure longtemps (> 5 minutes), elle aggravera le ramollissement du Co et augmentera indirectement la vitesse de déformation au fluage d'environ $10\% \pm 2\%$.

(5) Influence de la conductivité thermique

La conductivité thermique a une influence importante sur la performance en fatigue thermique en affectant la distribution des contraintes thermiques. Lorsque la conductivité thermique est $> 80 \text{ W/m} \cdot \text{K} \pm 5 \text{ W/m} \cdot \text{K}$, le gradient de température à l'intérieur du matériau diminue ($\Delta T / \Delta x$ diminue d'environ $30 \% \pm 5 \%$), la contrainte thermique diminue de $600 \text{ MPa} \pm 50 \text{ MPa}$ à $450 \text{ MPa} \pm 50 \text{ MPa}$, le taux de propagation des fissures diminue d'environ $20 \% \pm 5 \%$ et la longueur des fissures diminue de $0,05 \text{ mm} \pm 0,01 \text{ mm}$ à $0,04 \text{ mm} \pm 0,01 \text{ mm}$. Au contraire, lorsque la conductivité thermique est $< 50 \text{ W/m} \cdot \text{K} \pm 5 \text{ W/m} \cdot \text{K}$, le gradient de température augmente, la concentration de contrainte thermique s'intensifie et la longueur de fissure augmente d'environ $20 \% \pm 5 \%$, atteignant $0,06 \text{ mm} \pm 0,01 \text{ mm}$. L'effet de la conductivité thermique sur le fluage est plus indirect. Une conductivité thermique élevée contribue à réduire la durée des zones locales à haute température, à réduire le ramollissement de la phase Co et le glissement des joints de grains, et à

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

réduire le taux de déformation de fluage d'environ $10\% \pm 2\%$.

(6) Analyse de l'effet de couplage

Les facteurs ci-dessus affectent conjointement les propriétés de fatigue thermique et de fluage par des effets de couplage complexes. Par exemple, lorsqu'une forte différence de température (ΔT $600\text{ }^{\circ}\text{C} \pm 10\text{ }^{\circ}\text{C}$) est associée à une teneur élevée en Co ($12\% \pm 1\%$), la contrainte thermique et l'adoucissement du Co agissent ensemble, la longueur de fissure atteint $0,1\text{ mm} \pm 0,01\text{ mm}$ et la vitesse de déformation au fluage augmente à $2 \times 10^{-6}\text{ s}^{-1} \pm 10^{-7}\text{ s}^{-1}$, dépassant largement l'influence d'un seul facteur. Lorsque les grains fins ($0,51\text{ }\mu\text{m} \pm 0,01\text{ }\mu\text{m}$) et Cr_3C_2 ($0,5\% \pm 0,01\%$) travaillent ensemble, les effets d'entrave et de renforcement des joints de grains se superposent, la longueur des fissures est réduite à $0,03\text{ mm} \pm 0,01\text{ mm}$ et la vitesse de déformation par fluage est réduite à $6 \times 10^{-7}\text{ s}^{-1} \pm 10^{-7}\text{ s}^{-1}$, avec une amélioration significative des performances. Lorsque la faible conductivité thermique ($<50\text{ W/m}\cdot\text{K} \pm 5\text{ W/m}\cdot\text{K}$) est couplée à de gros grains ($>2\text{ }\mu\text{m} \pm 0,01\text{ }\mu\text{m}$), les chemins de propagation des contraintes thermiques et des fissures sont centralisés et la longueur des fissures augmente jusqu'à $0,08\text{ mm} \pm 0,01\text{ mm}$, ce qui indique que l'optimisation de la conductivité thermique et de la taille des grains doit être effectuée simultanément.

(7) Analyse de cas complète

En prenant comme exemples le WC-12Co et le WC-10Co (Cr_3C_2 $0,5\% \pm 0,01\%$), lors du test de choc thermique (ΔT $600\text{ }^{\circ}\text{C} \pm 10\text{ }^{\circ}\text{C}$, $1\text{ }000\text{ }^{\circ}\text{C} \pm 10\text{ }^{\circ}\text{C}$ à $25\text{ }^{\circ}\text{C} \pm 1\text{ }^{\circ}\text{C}$, 500 fois ± 50 fois), la longueur de fissure du WC-12Co a atteint $0,1\text{ mm} \pm 0,01\text{ mm}$ et le taux de croissance de la fissure était de $2 \times 10^{-7}\text{ mm/cycle} \pm 10^{-8}\text{ mm/cycle}$, tandis que celui du WC-10Co (Cr_3C_2 $0,5\% \pm 0,01\%$) n'était que de $0,03\text{ mm} \pm 0,01\text{ mm}$ et le taux de croissance de la fissure est tombé à $1,2 \times 10^{-7}\text{ mm/cycle} \pm 10^{-8}\text{ mm/cycle}$, la résistance à la fatigue thermique est améliorée d'environ $70\% \pm 5\%$. Dans l'essai de fluage ($1\text{ }000\text{ }^{\circ}\text{C} \pm 10\text{ }^{\circ}\text{C}$, $100\text{ MPa} \pm 10\text{ MPa}$, 100 heures), la vitesse de déformation du WC-12Co est de $1,5 \times 10^{-6}\text{ s}^{-1} \pm 10^{-7}\text{ s}^{-1}$, tandis que l'échantillon optimisé est réduit à $6 \times 10^{-7}\text{ s}^{-1} \pm 10^{-7}\text{ s}^{-1}$, et la résistance au fluage est améliorée d'environ $60\% \pm 5\%$. La conductivité thermique de l'échantillon optimisé est de $85\text{ W/m}\cdot\text{K} \pm 5\text{ W/m}\cdot\text{K}$ et la granulométrie est de $0,51\text{ }\mu\text{m} \pm 0,01\text{ }\mu\text{m}$. L'ajout de Cr_3C_2 améliore considérablement les performances.

(8) Importance de l'application et direction de l'optimisation

L'analyse de l'effet de couplage de la fatigue thermique et du fluage montre que l'optimisation doit prendre en compte de manière exhaustive la taille des grains, la teneur en Co, l'ajout de Cr_3C_2 , la différence de température et la conductivité thermique. Des grains fins et une quantité appropriée de Cr_3C_2 sont essentiels pour améliorer la résistance à la fatigue thermique et au fluage, tandis qu'une conductivité thermique élevée et une faible teneur en Co contribuent à améliorer encore les performances. Le carbure cémenté optimisé est performant dans les outils de turbines aéronautiques (durée de vie $> 5\text{ }000\text{ heures} \pm 500\text{ heures}$) et les moules haute température (service $> 1,5 \times 10^5$ fois $\pm 10^4$ fois), et la longueur de fissure et la vitesse de déformation au fluage répondent aux exigences des conditions de travail difficiles.

Français L'apparition de fatigue thermique et de fluage est affectée par le couplage de la taille des

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

grains, de la teneur en Co, de l'ajout de Cr_3C_2 , de la différence de température et de la conductivité thermique. Des grains fins ($0,51 \mu\text{m} \pm 0,01 \mu\text{m}$), une quantité appropriée de Co ($10 \% \pm 1 \%$), de Cr_3C_2 ($0,5 \% \pm 0,01 \%$), un faible ΔT ($< 300^\circ\text{C} \pm 10^\circ\text{C}$) et une conductivité thermique élevée ($> 80 \text{ W/m}\cdot\text{K} \pm 5 \text{ W/m}\cdot\text{K}$) sont tous utiles pour réduire la vitesse de croissance des fissures et la vitesse de déformation par fluage. Des cas complets montrent qu'après optimisation, la longueur des fissures est réduite de $70 \% \pm 5 \%$ et la vitesse de déformation est réduite de $60 \% \pm 5 \%$, ce qui fournit des orientations scientifiques pour les applications à haute température.

8.2.2.4 Stratégies d'optimisation de la fatigue thermique et du fluage pour le carbure cémenté

$10^{-6} \text{ s}^{-1} \pm 10^{-7} \text{ s}^{-1}$ du carbure cémenté dans un environnement à haute température ($800\text{-}1000^\circ\text{C} \pm 10^\circ\text{C}$), il est nécessaire d'améliorer systématiquement sa résistance à la fatigue thermique et au fluage par une optimisation complète de la microstructure, des additifs, du processus de frittage et du traitement de surface. Ces mesures d'optimisation visent à améliorer la résistance des joints de grains, à améliorer la conductivité thermique, à réduire la porosité et les défauts de surface, et à vérifier l'effet d'amélioration des performances par des tests scientifiques. En partant des aspects clés ci-dessus, combinés à la mécanique de la rupture, aux données thermodynamiques et aux cas d'ingénierie, les éléments suivants détaillent la stratégie d'optimisation et son rôle dans le contrôle du comportement à la fatigue thermique et au fluage.

(1) Optimisation de la microstructure

Le contrôle de la microstructure est la base de l'amélioration de la résistance à la fatigue thermique et au fluage. La granulométrie recommandée pour le WC est de $0,51 \mu\text{m} \pm 0,01 \mu\text{m}$ et la teneur en Co est contrôlée entre $8 \text{ et } 10 \% \pm 1 \%$. Les grains fins empêchent efficacement la propagation des fissures de fatigue thermique en augmentant la densité des joints de grains (aire des joints de grains $> 10^4 \text{ mm}^2/\text{cm}^3 \pm 10^3 \text{ mm}^2/\text{cm}^3$), l'angle de déviation des fissures atteint $30^\circ \pm 5^\circ$, le trajet des fissures est allongé et la vitesse de croissance des fissures (da/dN) est réduite de $2 \times 10^{-7} \text{ mm/cycle} \pm 10^{-8} \text{ mm/cycle}$ à $< 10^{-7} \text{ mm/cycle} \pm 10^{-8} \text{ mm/cycle}$. La faible teneur en Co ($8 \%-10 \% \pm 1 \%$) réduit le ramollissement à haute température (la dureté chute de $\text{HV } 600 \pm 30$ à $\text{HV } 250 \pm 30$), inhibe le glissement des joints de grains et réduit la vitesse de fluage de $1,5 \times 10^{-6} \text{ s}^{-1} \pm 10^{-7} \text{ s}^{-1}$ à $< 10^{-6} \text{ s}^{-1} \pm 10^{-7} \text{ s}^{-1}$. Dans le même temps, la microstructure optimisée améliore la conductivité thermique (cible $> 80 \text{ W/m}\cdot\text{K} \pm 5 \text{ W/m}\cdot\text{K}$), de $70 \text{ W/m}\cdot\text{K} \pm 5 \text{ W/m}\cdot\text{K}$ à $85 \text{ W/m}\cdot\text{K} \pm 5 \text{ W/m}\cdot\text{K}$, réduit la concentration de contrainte thermique (de $600 \text{ MPa} \pm 50 \text{ MPa}$ à $450 \text{ MPa} \pm 50 \text{ MPa}$) et réduit encore la longueur des fissures de fatigue thermique.

(2) Optimisation additive

L'ajout de carbure de chrome (Cr_3C_2) est un moyen essentiel d'améliorer la résistance à la fatigue thermique et au fluage. La quantité d'ajout recommandée est de $0,5 \% \pm 0,01 \%$. Le Cr_3C_2 se dissout dans la phase Co à haute température et forme une couche de Cr_2O_3 (épaisseur $0,2 \mu\text{m} \pm 0,05 \mu\text{m}$), ce qui augmente significativement la résistance aux joints de grains (de $180 \text{ MPa} \pm 20 \text{ MPa}$ à $> 200 \text{ MPa} \pm 20 \text{ MPa}$). La résistance accrue des joints de grains a supprimé la propagation des fissures de fatigue thermique par effet d'épinglage, et la longueur des fissures a été réduite d'environ $40 \% \pm$

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

5 %, passant de $0,05 \text{ mm} \pm 0,01 \text{ mm}$ à $0,03 \text{ mm} \pm 0,01 \text{ mm}$, et le taux de croissance des fissures a été réduit de $2 \times 10^{-7} \text{ mm/cycle} \pm 10^{-8} \text{ mm/cycle}$ à $1,2 \times 10^{-7} \text{ mm/cycle} \pm 10^{-8} \text{ mm/cycle}$. Cr_3C_2 réduit également l'énergie d'activation du fluage (de $300 \text{ kJ/mol} \pm 10 \text{ kJ/mol}$ à $250 \text{ kJ/mol} \pm 10 \text{ kJ/mol}$) et réduit la vitesse de déformation par fluage d'environ $40 \% \pm 5 \%$, de $10^{-6} \text{ s}^{-1} \pm 10^{-7} \text{ s}^{-1}$ à $6 \times 10^{-7} \text{ s}^{-1} \pm 10^{-7} \text{ s}^{-1}$, en inhibant le glissement de phase Co et la diffusion aux joints de grains. La spectroscopie dispersive en énergie (EDS) montre que la teneur en Cr aux joints de grains est d'environ $5 \% \pm 0,5 \%$, ce qui confirme son effet de renforcement.

(3) Optimisation du processus de frittage

L'optimisation du procédé de frittage affecte directement la compacité et la résistance au fluage du carbure cémenté. La température de frittage recommandée est de $1450^\circ\text{C} \pm 10^\circ\text{C}$, et le vide ou une atmosphère inerte (comme l'Ar) est utilisé pour réduire l'oxydation, garantissant une densité du matériau de $99,5 \% \pm 0,1 \%$ et une porosité inférieure à $0,1 \% \pm 0,02 \%$. La structure haute densité réduit les pores internes et les microfissures, limite la concentration des contraintes thermiques et les voies de diffusion de l'oxygène, et réduit la longueur des fissures de fatigue thermique de $0,06 \text{ mm} \pm 0,01 \text{ mm}$ à $0,04 \text{ mm} \pm 0,01 \text{ mm}$. Français La faible porosité ($< 0,1 \% \pm 0,02 \%$) améliore également la résistance de liaison des joints de grains ($> 200 \text{ MPa} \pm 20 \text{ MPa}$), réduisant l'apparition de glissement des joints de grains pendant le fluage et réduisant la vitesse de déformation de $1,2 \times 10^{-6} \text{ s}^{-1} \pm 10^{-7} \text{ s}^{-1}$ à $< 10^{-6} \text{ s}^{-1} \pm 10^{-7} \text{ s}^{-1}$. Le contrôle précis de la température de frittage ($1450^\circ\text{C} \pm 10^\circ\text{C}$) assure une distribution uniforme du Co (écart $< 0,1 \% \pm 0,02 \%$), évitant ainsi une défaillance préférentielle dans les zones de ramollissement locales.

(4) Optimisation du traitement de surface

L'optimisation de l'état de surface est un moyen important de réduire les fissures de fatigue thermique et d'améliorer la résistance au fluage. Il est recommandé de maintenir la rugosité de surface (R_a) à moins de $0,05 \mu\text{m} \pm 0,01 \mu\text{m}$ par polissage mécanique de précision. Ce procédé permet de réduire l'incidence des fissures de fatigue thermique d'environ $20 \% \pm 5 \%$, et leur longueur de $0,05 \text{ mm} \pm 0,01 \text{ mm}$ à $0,04 \text{ mm} \pm 0,01 \text{ mm}$. Une faible rugosité réduit les défauts de surface (tels que les micro-rayures et les piqûres), limite la concentration des contraintes thermiques et les points d'amorçage des fissures, et réduit les fissures secondaires induites par l'écaillage de la couche d'oxyde. Après le polissage, un nettoyage par ultrasons ($40 \text{ kHz} \pm 1 \text{ kHz}$) peut être utilisé pour éliminer les contaminants de surface ($< 0,1 \% \pm 0,02 \%$), améliorer encore l'intégrité de la surface et réduire la formation de bandes de glissement de surface pendant le fluage (largeur de $0,6 \mu\text{m} \pm 0,1 \mu\text{m}$ à $0,4 \mu\text{m} \pm 0,1 \mu\text{m}$).

(5) Spécifications des tests

Pour évaluer avec précision l'effet d'optimisation des propriétés de fatigue thermique et de fluage, il est recommandé d'utiliser la norme ASTM E1876 pour les essais de choc thermique, simulant des cycles thermiques de $1000^\circ\text{C} \pm 10^\circ\text{C}$ à $25^\circ\text{C} \pm 1^\circ\text{C}$, avec un nombre de cycles $> 500 \pm 50$ fois, et la longueur de fissure est mesurée par microscopie optique (grossissement $200\times$) et SEM (résolution $< 0,1 \mu\text{m} \pm 0,01 \mu\text{m}$), avec une cible de $< 0,05 \text{ mm} \pm 0,01 \text{ mm}$. Les essais de fluage sont réalisés à $1\,000^\circ\text{C} \pm 10^\circ\text{C}$ et sous une contrainte constante de $100 \text{ MPa} \pm 10 \text{ MPa}$, à l'aide d'un testeur de

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

fluage haute température (précision de mesure de déformation $\pm 0,001\%$), et en enregistrant la vitesse de déformation à l'état stationnaire, avec un objectif de $< 10^{-6} \text{ s}^{-1} \pm 10^{-7} \text{ s}^{-1}$. Après l'essai, la formation de la couche de Cr_2O_3 (pic de Cr 3p 577 eV $\pm 0,1$ eV) peut être analysée par spectroscopie de photoélectrons X (XPS) pour vérifier l'effet de renforcement des joints de grains. Ces spécifications garantissent la scientificité et la répétabilité de l'évaluation des performances.

(6) Analyse complète du cas

En prenant l'échantillon WC-10Co ($\text{Cr}_3\text{C}_2 0,5\% \pm 0,01\%$) comme exemple, dans le test de choc thermique ASTM E1876 ($1000^\circ\text{C} \pm 10^\circ\text{C}$ à $25^\circ\text{C} \pm 1^\circ\text{C}$, 500 fois ± 50 fois), la longueur de fissure n'était que de $0,03 \text{ mm} \pm 0,01 \text{ mm}$, et le taux de croissance de fissure était $< 10^{-7} \text{ mm/cycle} \pm 10^{-8} \text{ mm/cycle}$, ce qui était $40\% \pm 5\%$ inférieur au $0,05 \text{ mm} \pm 0,01 \text{ mm}$ non optimisé. Français Dans l'essai de fluage ($1000^\circ\text{C} \pm 10^\circ\text{C}$, $100 \text{ MPa} \pm 10 \text{ MPa}$, 100 heures), la vitesse de déformation était de $6 \times 10^{-7} \text{ s}^{-1} \pm 10^{-7} \text{ s}^{-1}$, ce qui était inférieur à la valeur non optimisée de $10^{-6} \text{ s}^{-1} \pm 10^{-7} \text{ s}^{-1}$, et la résistance au fluage a été améliorée d'environ $40\% \pm 5\%$. L'observation au MEB a montré que l'angle de déviation des fissures de l'échantillon optimisé était de $30^\circ \pm 5^\circ$ et que la largeur de la bande de glissement était de $0,3 \mu\text{m} \pm 0,1 \mu\text{m}$, indiquant l'effet synergique du renforcement de la microstructure et des joints de grains. Ces performances répondent aux exigences des outils d'usage d'aubes de turbines aéronautiques (durée de vie $> 5000 \text{ heures} \pm 500 \text{ heures}$) et des moules haute température (service $> 1,5 \times 10^5$ fois $\pm 10^4$ fois).

(7) Performance dynamique et importance de l'application

Les essais dynamiques montrent que la croissance des fissures de fatigue thermique se stabilise après 500 ± 50 cycles et que la longueur des fissures augmente lentement de $0,03 \text{ mm} \pm 0,01 \text{ mm}$ à $0,035 \text{ mm} \pm 0,01 \text{ mm}$, ce qui indique que le matériau optimisé présente une bonne stabilité cyclique. La déformation de fluage entre en régime permanent après 100 heures et la vitesse de déformation reste inférieure à $10^{-6} \text{ s}^{-1} \pm 10^{-7} \text{ s}^{-1}$, ce qui confirme sa capacité de charge à long terme. Le carbure cémenté optimisé fonctionne bien dans les outils aéronautiques (température de coupe $900\text{-}1000^\circ\text{C}$, durée de vie $> 5000 \text{ heures} \pm 500 \text{ heures}$), les moules à haute température (température de moulage $800\text{-}900^\circ\text{C}$, cycles $> 10^5$ fois $\pm 10^4$ fois) et les composants de turbines à gaz (température de service $950^\circ\text{C} \pm 10^\circ\text{C}$, durée de vie $> 10^4$ heures $\pm 10^3$ heures), avec une durée de vie augmentée de $50\%\text{-}70\% \pm 5\%$ et des coûts de maintenance annuels réduits d'environ $35\% \pm 5\%$.

(8) Adaptabilité environnementale et perspectives d'avenir

La stratégie d'optimisation est toujours efficace dans des environnements à forte différence de température ($\Delta T 600^\circ\text{C} \pm 10^\circ\text{C}$) et à vapeur d'eau (humidité $> 50\% \pm 5\%$), avec une longueur de fissure et une vitesse de déformation maintenues respectivement à $< 0,04 \text{ mm} \pm 0,01 \text{ mm}$ et $< 8 \times 10^{-7} \text{ s}^{-1} \pm 10^{-7} \text{ s}^{-1}$, ce qui convient aux conditions humides et chaudes (comme les moteurs d'aviation tropicaux). À des températures plus élevées ($> 1100^\circ\text{C} \pm 10^\circ\text{C}$) ou dans des atmosphères de soufre (SO_2), des revêtements multicouches (tels que $\text{Al}_2\text{O}_3 / \text{TiN}$, épaisseur $5\text{-}10 \mu\text{m} \pm 0,1 \mu\text{m}$) ou de nouveaux additifs (tels que TaC) peuvent être combinés pour améliorer encore la conductivité thermique et la résistance des joints de grains afin de répondre aux besoins des dispositifs haute température de nouvelle génération.

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

L'optimisation de la fatigue thermique et du fluage du carbure cimenté doit être obtenue grâce au contrôle de la microstructure (grain WC $0,51 \mu\text{m} \pm 0,01 \mu\text{m}$, Co 8%-10% $\pm 1\%$, conductivité thermique $> 80 \text{ W/m}\cdot\text{K} \pm 5 \text{ W/m}\cdot\text{K}$), ajout de Cr_3C_2 (0,5% $\pm 0,01\%$, résistance aux joints de grains $> 200 \text{ MPa} \pm 20 \text{ MPa}$), processus de frittage ($1450^\circ\text{C} \pm 10^\circ\text{C}$, densité $> 99,5\% \pm 0,1\%$) et traitement de surface ($R_a < 0,05 \mu\text{m} \pm 0,01 \mu\text{m}$, réduction des fissures 20% $\pm 5\%$). Après optimisation, la longueur de fissure est réduite à $0,03 \text{ mm} \pm 0,01 \text{ mm}$ et la vitesse de déformation est $< 10^{-6} \text{ s}^{-1} \pm 10^{-7} \text{ s}^{-1}$, répondant aux exigences de température élevée de l'aviation et des moules.

8.2.2.5 Application technique de l'optimisation des performances de fatigue thermique et de fluage du carbure cimenté

Le carbure cimenté optimisé présente d'excellentes performances en fatigue thermique et en fluage dans des environnements cycliques à haute température ($800\text{-}1000^\circ\text{C} \pm 10^\circ\text{C}$). Grâce à la régulation de la microstructure, à l'optimisation additive, à l'amélioration du procédé de frittage et au traitement de surface, la fiabilité de ses applications techniques dans les domaines de l'aéronautique, de la fabrication de moules et des équipements énergétiques a été considérablement améliorée. Ces mesures d'optimisation réduisent la vitesse de propagation des fissures, suppriment la vitesse de fluage et prolongent la durée de vie, offrant ainsi une solution efficace et durable aux conditions de haute température. Ce qui suit présente en détail les applications techniques et les avantages en termes de performances du carbure cimenté optimisé dans les trois principaux domaines d'application que sont les aubes de turbines aéronautiques, les moules haute température et les tuyères de turbines à gaz, en s'appuyant sur des données expérimentales, des analyses microscopiques et des cas réels.

(1) Aubes de turbine d'aviation en carbure cimenté

Les aubes de turbines d'aviation sont soumises à des contraintes thermiques répétées (par exemple $1000^\circ\text{C} \pm 10^\circ\text{C}$ à $25^\circ\text{C} \pm 1^\circ\text{C}$) et à des charges de coupe dans des cycles à haute température (ΔT $500^\circ\text{C} \pm 10^\circ\text{C}$), ce qui impose des exigences extrêmement élevées en matière de résistance à la fatigue thermique et de durée de vie. Le carbure cimenté WC-10Co optimisé (addition de Cr_3C_2 0,5 % $\pm 0,01$ %, granulométrie $0,5 \mu\text{m} \pm 0,01 \mu\text{m}$) présente une longueur de fissure de fatigue thermique de seulement $0,03 \text{ mm} \pm 0,01 \text{ mm}$ et un taux de croissance des fissures de $< 10^{-7} \text{ mm/cycle} \pm 10^{-8} \text{ mm/cycle}$ dans le test de choc thermique ASTM E1876 (ΔT $500^\circ\text{C} \pm 10^\circ\text{C}$, 500 fois ± 50 fois), ce qui est meilleur que le $0,05 \text{ mm} \pm 0,01 \text{ mm}$ non optimisé (taux de croissance $2 \times 10^{-7} \text{ mm/cycle} \pm 10^{-8} \text{ mm/cycle}$). Français Les grains fins empêchent la déflexion des fissures (angle de déflexion $30^\circ \pm 5^\circ$) en augmentant la densité des joints de grains ($> 10^4 \text{ mm}^2/\text{cm}^3 \pm 10^3 \text{ mm}^2/\text{cm}^3$), et la couche de Cr_2O_3 (épaisseur $0,2 \mu\text{m} \pm 0,05 \mu\text{m}$) améliore la résistance des joints de grains ($> 200 \text{ MPa} \pm 20 \text{ MPa}$), atténuant efficacement la concentration de contraintes thermiques (de $600 \text{ MPa} \pm 50 \text{ MPa}$ à $450 \text{ MPa} \pm 50 \text{ MPa}$). Dans les applications pratiques, la durée de vie de coupe des aubes de turbine fabriquées dans ce matériau dépasse 5 000 heures ± 500 heures, ce qui est environ 67 % ± 5 % de plus que les 3 000 heures ± 300 heures non optimisées. Dans les moteurs

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

d'avion, l'optimisation de la résistance à la fatigue thermique des pales réduit le taux de défaillance causé par les fissures thermiques d'environ $40\% \pm 5\%$, améliorant ainsi la sécurité des vols.

(2) Moule haute température en alliage dur

Les moules haute température (tels que les moules de forgeage à chaud et les moules de coulée sous pression) doivent résister à des cycles thermiques répétés et à des charges continues dans des conditions de service de $1000\text{ }^{\circ}\text{C} \pm 10\text{ }^{\circ}\text{C}$, et présentent des exigences extrêmement élevées en matière de résistance au fluage et de durée de vie. Lors de l'essai de fluage du carbure cémenté WC-8Co optimisé (conductivité thermique $> 80\text{ W/m}\cdot\text{K} \pm 5\text{ W/m}\cdot\text{K}$) à $1000\text{ }^{\circ}\text{C} \pm 10\text{ }^{\circ}\text{C}$ et $100\text{ MPa} \pm 10\text{ MPa}$, la vitesse de déformation est contrôlée à $< 10^{-6}\text{ s}^{-1} \pm 10^{-7}\text{ s}^{-1}$, ce qui est inférieur à la valeur non optimisée de $1,5 \times 10^{-6}\text{ s}^{-1} \pm 10^{-7}\text{ s}^{-1}$. Français La conductivité thermique élevée (augmentée de $70\text{ W/m}\cdot\text{K} \pm 5\text{ W/m}\cdot\text{K}$ à $85\text{ W/m}\cdot\text{K} \pm 5\text{ W/m}\cdot\text{K}$) réduit le gradient de température ($\Delta T/\Delta x$ diminue d'environ $30\% \pm 5\%$), la contrainte thermique diminue de $550\text{ MPa} \pm 50\text{ MPa}$ à $400\text{ MPa} \pm 50\text{ MPa}$ et réduit l'accumulation de déformations de fluage. Une faible teneur en Co ($8\% \pm 1\%$) et un frittage optimisé (densité $> 99,5\% \pm 0,1\%$) inhibent davantage le ramollissement du Co (la dureté reste $> \text{HV } 1300 \pm 30$), et la largeur de la bande de glissement diminue de $0,6\text{ }\mu\text{m} \pm 0,1\text{ }\mu\text{m}$ à $0,3\text{ }\mu\text{m} \pm 0,1\text{ }\mu\text{m}$. Dans les applications pratiques, le cycle de service des moules haute température fabriqués avec ce matériau est supérieur à 10^5 fois $\pm 10^4$ fois, soit environ $50\% \pm 5\%$ de plus que les 6×10^4 fois $\pm 10^4$ fois non optimisés. Lors du forgeage à chaud de pièces automobiles, l'optimisation de la résistance au fluage des matrices prolonge la durée de vie d'environ $50\% \pm 5\%$, réduisant ainsi la fréquence de remplacement et les arrêts de production.

(3) Buse de turbine à gaz en alliage dur

Les buses de turbine à gaz sont soumises à une fatigue thermique et à des charges à long terme dans un environnement oxydant à haute température à $900\text{ }^{\circ}\text{C} \pm 10\text{ }^{\circ}\text{C}$, ce qui impose des exigences extrêmement élevées en matière de contrôle de la croissance des fissures et de durée de vie. Français Dans l'essai de choc thermique à $900^{\circ}\text{C} \pm 10^{\circ}\text{C}$ ($\Delta T 400^{\circ}\text{C} \pm 10^{\circ}\text{C}$, 500 fois ± 50 fois), le carbure cémenté WC - 10Co optimisé (ajouté avec Cr_3C_2 $0,5\% \pm 0,01\%$) a une longueur de fissure de fatigue thermique de $< 0,04\text{ mm} \pm 0,01\text{ mm}$ et une vitesse de croissance de fissure de $< 1,5 \times 10^{-7}\text{ mm/cycle} \pm 10^{-8}\text{ mm/cycle}$, ce qui est meilleur que le $0,06\text{ mm} \pm 0,01\text{ mm}$ non optimisé (taux de croissance de $2,5 \times 10^{-7}\text{ mm/cycle} \pm 10^{-8}\text{ mm/cycle}$). La couche de Cr_2O_3 (teneur en Cr d'environ $5\% \pm 0,5\%$) et les grains fins ($0,5\text{ }\mu\text{m} \pm 0,01\text{ }\mu\text{m}$) travaillent ensemble pour améliorer la résistance aux joints de grains ($> 200\text{ MPa} \pm 20\text{ MPa}$) et supprimer la concentration de contrainte thermique (de $500\text{ MPa} \pm 50\text{ MPa}$ à $350\text{ MPa} \pm 50\text{ MPa}$). Français Dans l'essai de fluage ($900^{\circ}\text{C} \pm 10^{\circ}\text{C}$, $100\text{ MPa} \pm 10\text{ MPa}$, 100 heures), la vitesse de déformation est $< 8 \times 10^{-7}\text{ s}^{-1} \pm 10^{-7}\text{ s}^{-1}$, ce qui est inférieur à la valeur non optimisée de $1,2 \times 10^{-6}\text{ s}^{-1} \pm 10^{-7}\text{ s}^{-1}$. Dans les applications pratiques, la durée de vie des buses fabriquées avec ce matériau dépasse 10^4 heures $\pm 10^3$ heures, répondant aux exigences de fonctionnement à long terme des équipements énergétiques (tels que les turbines à gaz industrielles), ce qui est meilleur que les 6×10^3 heures $\pm 10^3$ heures non optimisées. Dans les centrales électriques, la résistance optimisée à la fatigue thermique des buses réduit le taux de défaillance causé par les fissures thermiques d'environ $45\% \pm 5\%$, améliorant ainsi l'efficacité de fonctionnement de l'équipement.

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

(4) Valeur technique de l'optimisation des performances

Les cas ci-dessus montrent que l'optimisation des propriétés de fatigue thermique et de fluage améliore considérablement la fiabilité du carbure cémenté dans les environnements de cyclage à haute température. Grâce à l'optimisation de la microstructure (grain WC $0,5 \mu\text{m} \pm 0,01 \mu\text{m}$, Co $8\%-10\% \pm 1\%$, conductivité thermique $> 80 \text{ W/m}\cdot\text{K} \pm 5 \text{ W/m}\cdot\text{K}$), à l'ajout de Cr_3C_2 ($0,5\% \pm 0,01\%$, résistance aux joints de grains $> 200 \text{ MPa} \pm 20 \text{ MPa}$), au procédé de frittage ($1450^\circ\text{C} \pm 10^\circ\text{C}$, densité $> 99,5\% \pm 0,1\%$) et au traitement de surface ($R_a < 0,05 \mu\text{m} \pm 0,01 \mu\text{m}$), la longueur des fissures de fatigue thermique du carbure cémenté a diminué de $0,05\text{--}0,1 \text{ mm} \pm 0,01 \text{ mm}$ à $0,03\text{--}0,04 \text{ mm} \pm 0,01 \text{ mm}$, et la vitesse de déformation par fluage a diminué de $1,2\text{--}1,5 \times 10^{-6} \text{ s}^{-1} \pm 10^{-7} \text{ s}^{-1}$ à $< 10^{-6} \text{ s}^{-1} \pm 10^{-7} \text{ s}^{-1}$. Cette amélioration des performances prolonge la durée de vie (par exemple, aubes de turbine d'aviation $> 5000 \text{ heures} \pm 500 \text{ heures}$, moules à haute température $> 10^5 \text{ fois} \pm 10^4 \text{ fois}$, buses de turbine à gaz $> 10^4 \text{ heures} \pm 10^3 \text{ heures}$) de 50% à $67\% \pm 5\%$ et réduit les coûts de maintenance. Par exemple, le coût annuel de maintenance des aubes de turbine d'aviation est réduit d'environ $35\% \pm 5\%$, le cycle de remplacement des moules à haute température est prolongé de $50\% \pm 5\%$ et l'efficacité de fonctionnement des buses de turbine à gaz est améliorée d'environ $20\% \pm 3\%$.

(5) Adaptabilité environnementale et expansion des applications

Le carbure cémenté optimisé présente une forte adaptabilité environnementale, lui permettant de faire face à des conditions de cycle thermique plus complexes. Par exemple, dans un environnement à haute température contenant de la vapeur d'eau (humidité $> 50\% \pm 5\%$, ΔT $500^\circ\text{C} \pm 10^\circ\text{C}$), la couche de Cr_2O_3 maintient la longueur des fissures à $< 0,05 \text{ mm} \pm 0,01 \text{ mm}$ et la vitesse de déformation à $< 10^{-6} \text{ s}^{-1} \pm 10^{-7} \text{ s}^{-1}$, ce qui est adapté aux environnements humides et chauds des moteurs d'aviation. Dans une atmosphère contenant du soufre (SO_2) ou à une différence de température plus élevée (ΔT $600^\circ\text{C} \pm 10^\circ\text{C}$), la longueur de fissure de fatigue thermique de l'échantillon optimisé augmente à $0,04 \text{ mm} \pm 0,01 \text{ mm}$, mais peut être encore réduite à $0,03 \text{ mm} \pm 0,01 \text{ mm}$ grâce à des revêtements multicouches (tels que $\text{Al}_2\text{O}_3 / \text{TiN}$, épaisseur $5\text{--}10 \mu\text{m} \pm 0,1 \mu\text{m}$), élargissant son potentiel d'application dans les dispositifs énergétiques contenant du soufre et les cycles thermiques extrêmes. De plus, dans un environnement à ultra-haute température de $1100^\circ\text{C} \pm 10^\circ\text{C}$, combiné à de nouveaux additifs (tels que TaC), la vitesse de déformation peut être contrôlée à $8 \times 10^{-7} \text{ s}^{-1} \pm 10^{-7} \text{ s}^{-1}$, répondant ainsi aux besoins de l'aérospatiale de nouvelle génération.

(6) Cas complets et perspectives d'avenir

En prenant comme exemple le WC-10Co (Cr_3C_2 $0,5\% \pm 0,01\%$, conductivité thermique $> 80 \text{ W/m}\cdot\text{K} \pm 5 \text{ W/m}\cdot\text{K}$), après 500 ± 50 chocs thermiques à ΔT $500^\circ\text{C} \pm 10^\circ\text{C}$, la longueur de fissure est de $0,03 \text{ mm} \pm 0,01 \text{ mm}$; après 100 heures de fluage à $1000^\circ\text{C} \pm 10^\circ\text{C}$ et $100 \text{ MPa} \pm 10 \text{ MPa}$, la vitesse de déformation est de $6 \times 10^{-7} \text{ s}^{-1} \pm 10^{-7} \text{ s}^{-1}$; Lors de l'essai de fatigue thermique à $900^\circ\text{C} \pm 10^\circ\text{C}$, la longueur de fissure est inférieure à $0,04 \text{ mm} \pm 0,01 \text{ mm}$. Ces données montrent que le carbure cémenté optimisé présente une excellente résistance à la fatigue thermique et au fluage dans les aubes de turbines d'aviation, les moules haute température et les tuyères de turbines

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

à gaz, avec une durée de vie accrue de $67 \% \pm 5 \%$, $50 \% \pm 5 \%$ et $67 \% \pm 5 \%$, respectivement. À l'avenir, les performances du carbure cimenté optimisé dans des environnements à très haute température ($> 1\,100\,^{\circ}\text{C} \pm 10\,^{\circ}\text{C}$) ou à nombre de cycles élevé ($> 10^6$ fois $\pm 10^4$ fois) pourront être encore améliorées par le développement de matériaux à gradient fonctionnel ou l'introduction de nanorevêtements (tels que ZrO_2 , épaisseur $5\text{-}15\,\mu\text{m} \pm 0,1\,\mu\text{m}$) pour répondre à des besoins d'ingénierie plus exigeants.

(7) Performance dynamique et avantages économiques

Les essais dynamiques montrent que l'extension des fissures de fatigue thermique se stabilise après 500 ± 50 essais, et que la longueur des fissures passe de $0,03\,\text{mm} \pm 0,01\,\text{mm}$ à $0,035\,\text{mm} \pm 0,01\,\text{mm}$, ce qui indique une bonne durabilité cyclique du matériau optimisé. La déformation de fluage atteint son état stationnaire après 100 heures, et la vitesse de déformation reste inférieure à $10^{-6}\,\text{s}^{-1}$ $\pm 10^{-7}\,\text{s}^{-1}$, ce qui confirme sa capacité de charge à long terme. Cette amélioration des performances prolonge non seulement la durée de vie de l'équipement, mais réduit également considérablement les coûts d'exploitation. Par exemple, le coût annuel de maintenance des aubes de turbine d'aviation est réduit d'environ $35 \% \pm 5 \%$, le cycle de remplacement des moules à haute température est prolongé de $50 \% \pm 5 \%$ et l'efficacité de fonctionnement des buses de turbine à gaz est augmentée d'environ $20 \% \pm 3 \%$, ce qui reflète la valeur économique de l'optimisation.

Le carbure cimenté optimisé offre de bonnes performances dans les environnements cycliques à haute température. Les formulations WC-10Co et WC-8Co présentent une longueur de fissure de fatigue thermique ($0,03\text{-}0,04\,\text{mm} \pm 0,01\,\text{mm}$), une vitesse de fluage ($< 10^{-6}\,\text{s}^{-1} \pm 10^{-7}\,\text{s}^{-1}$) et une durée de vie ($> 5\,000$ heures ± 500 heures, $> 10^5$ fois $\pm 10^4$ fois, $> 10^4$ heures $\pm 10^3$ heures) supérieures à celles des matériaux traditionnels utilisés dans les aubes de turbines d'aviation, les moules haute température et les tuyères de turbines à gaz. Ces cas d'application démontrent pleinement que l'optimisation des propriétés de fatigue thermique et de fluage est une stratégie clé pour améliorer la fiabilité et les avantages économiques du carbure cimenté dans les applications d'ingénierie à haute température.

8.3 Méthodes d'optimisation de la résistance à la corrosion et à haute température du carbure cimenté

Français La résistance à la corrosion (perte de poids $< 0,08\,\text{mg}/\text{cm}^2 \pm 0,01\,\text{mg}/\text{cm}^2$) et la résistance aux hautes températures (dureté $> \text{HV } 1200 \pm 30$, $1000^{\circ}\text{C} \pm 10^{\circ}\text{C}$) sont essentielles pour améliorer l'application du carbure cimenté dans les environnements acides, au brouillard salin et à haute température (tels que les équipements aéronautiques et énergétiques). Ces améliorations de performances peuvent être obtenues grâce à une variété de méthodes scientifiques, y compris (1) la substitution de phase liante, (2) l'introduction d'additifs, (3) la technologie de revêtement de surface, et (4) l'optimisation des paramètres de processus et (5) la régulation de la microstructure, qui fonctionnent ensemble pour répondre aux besoins des conditions de travail exigeantes. La phase liante traditionnelle Co est sujette au ramollissement (la dureté chute à $\text{HV } 200 \pm 30$) et à l'oxydation (générant Co_3O_4) à haute température, ce qui entraîne une corrosion et une dégradation des

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

performances. Français La méthode d'optimisation remplace le Co par une phase liante à base de Ni (Ni 8%-12% $\pm$ 1%), qui forme une couche de passivation NiO (épaisseur ~ 10 nm $\pm$ 1 nm), réduisant significativement le courant de corrosion ($i_{\text{corr}} < 10^{-6}$ A/cm² $\pm$ 10^{-7} A/cm²), améliorant la résistance à la corrosion. L'ajout de Cr₃C₂ (0,5% $\pm$ 0,01%) inhibe l'oxydation en formant une couche dense de Cr₂O₃ (épaisseur $\sim 0,2$ μ m $\pm$ 0,05 μ m), et le gain de poids est contrôlé à $< 0,3$ mg/cm² $\pm$ 0,05 mg/cm². Revêtements de surface (tels que TiN, Les carbures cémentés (Al₂O₃, épaisseur 5-20 μ m $\pm$ 0,1 μ m) sont isolés de l'oxygène et des milieux corrosifs par dépôt physique en phase vapeur (PVD) ou chimique en phase vapeur (CVD), améliorant ainsi leur résistance à l'oxydation et à l'usure. Ces méthodes d'optimisation améliorent non seulement la résistance à la corrosion et la stabilité à haute température du carbure cémenté, mais prolongent également considérablement sa durée de vie dans les cycles à haute température et les environnements corrosifs.

de la phase de liaison à base de Ni, l'effet antioxydant de l'ajout de Cr₃C₂, la protection du revêtement de surface et l'optimisation coordonnée du procédé et de la microstructure. En combinant les paramètres du procédé (frittage 1450 °C $\pm$ 10 °C, PVD 400 °C $\pm$ 10 °C), l'analyse microscopique (XPS, SEM) et les cas d'ingénierie, la voie d'optimisation et son mécanisme d'amélioration des performances sont systématiquement discutés. Par exemple, le WC-10Ni ne perd que 0,05 mg/cm² dans un environnement de brouillard salin à 5 % de NaCl. $\pm$ 0,01 mg/cm², la résistance à la corrosion est améliorée d'environ 60 % $\pm$ 5 % par rapport au WC-10Co traditionnel ; la dureté de l'outil avec ajout de Cr₃C₂ et revêtu de TiN est maintenue à $> HV 1500 \pm 30$ à 1000°C $\pm$ 10°C, et la durée de vie de coupe dépasse 5000 heures $\pm$ 500 heures, ce qui est nettement mieux que les 3000 heures $\pm$ 300 heures non optimisées.

8.3.1 Avantages de la résistance à la corrosion de la phase de liaison à base de Ni dans le carbure cémenté

8.3.1.1 Principe et aperçu technique des avantages de la résistance à la corrosion de la phase de liaison en carbure cémenté à base de Ni

La phase de liaison à base de Ni (teneur en Ni 8%-12% $\pm$ 1%) présente une excellente stabilité électrochimique et une excellente résistance à la corrosion, ce qui améliore considérablement la résistance à la corrosion du carbure cémenté dans des environnements difficiles tels que les environnements acides (pH $< 3 \pm 0,1$), les brouillards salins (NaCl 5% $\pm$ 0,1%) et marins, et présente des avantages évidents par rapport à la phase de liaison traditionnelle à base de Co. Français Le potentiel de corrosion du Ni ($E_{\text{corr}} \sim 0,1$ V $\pm$ 0,02 V vs. SCE) est plus élevé que celui du Co ($E_{\text{corr}} \sim -0,3$ V $\pm$ 0,02 V vs. SCE), et la densité de courant de corrosion (i_{corr}) est considérablement réduite à $< 10^{-6}$ A/cm² $\pm$ 10^{-7} A/cm², ce qui est meilleur que les 10^{-5} A/cm² $\pm$ 10^{-6} A/cm² à base de Co. Cette différence de performance est due à la formation d'une couche de passivation dense de NiO (épaisseur ~ 10 nm $\pm$ 1 nm, densité $\sim 6,7$ g/cm³) dans un environnement corrosif. Français $\pm 0,1$ g/cm³, cette couche isole efficacement les milieux corrosifs (tels que Cl⁻, H⁺) grâce à son inertie chimique et bloque les réactions électrochimiques (formule de réaction : Ni + 1/2O₂ $\rightarrow$ NiO, $\Delta G < 0$ kJ/mol $\pm$ 10 kJ/mol). En revanche, la phase de liaison à base de Co génère facilement du Co₃O₄ libre (densité $\sim 6,1$ g/cm³, épaisseur $> 0,5$ μ m $\pm$ 0,1 μ m) dans des conditions

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

similaires, et sa faible protection conduit à une augmentation du taux de corrosion d'environ 10 fois. Français Tout en conservant une dureté élevée ($HV 1800 \pm 30$) et une ténacité ($K_{IC} 12 \text{ MPa} \cdot \text{m}^{1/2} \pm 0,5 \text{ MPa} \cdot \text{m}^{1/2}$), le carbure cimenté WC à base de Ni a amélioré la résistance à la corrosion d'environ $60 \% \pm 5 \%$, ce qui le rend particulièrement adapté aux domaines nécessitant une résistance à la corrosion et des propriétés mécaniques élevées, tels que les composants de forage offshore, les pipelines chimiques et les équipements de fabrication de papier. De plus, le Ni a un point de fusion plus élevé ($1455^\circ\text{C} \pm 10^\circ\text{C}$) que le Co ($1495^\circ\text{C} \pm 10^\circ\text{C}$), et son degré de ramollissement est plus faible à une température élevée de $1000^\circ\text{C} \pm 10^\circ\text{C}$ (réduction de la dureté $< 10 \% \pm 2 \%$), ce qui renforce encore son potentiel d'application dans les environnements corrosifs à haute température.

8.3.1.2 Analyse du mécanisme de résistance à la corrosion de la phase de liaison à base de Ni dans le carbure cimenté

L'avantage de la résistance à la corrosion de la phase de liaison à base de Ni provient de ses propriétés électrochimiques et physiques uniques. En milieu acide (tel que $0,1 \text{ M H}_2\text{SO}_4$, $\text{pH } 1 \pm 0,1$), le Ni forme une couche de NiO par un mécanisme d'auto-passivation. Cette couche présente une faible solubilité ($K_{sp} \sim 10^{-15} \pm 10^{-16}$) et une conductivité élevée ($\sigma \sim 10^{-4} \text{ S/cm} \pm 10^{-5} \text{ S/cm}$), ce qui inhibe efficacement la diffusion de H^+ et Cl^- , et le courant de corrosion est réduit de $10^{-5} \text{ A/cm}^2 \pm 10^{-6} \text{ A/cm}^2$ à base de Co à $< 10^{-6} \text{ A/cm}^2 \pm 10^{-7} \text{ A/cm}^2$. Français L'analyse par spectroscopie de photoélectrons à rayons X (XPS) montre que le pic Ni 2p (environ $854 \text{ eV} \pm 0,1 \text{ eV}$) indique la présence de NiO, et son énergie de liaison correspond au pic O 1s ($530 \text{ eV} \pm 0,1 \text{ eV}$), vérifiant la composition chimique de la couche de passivation. Dans un environnement de brouillard salin ($\text{NaCl } 5 \% \pm 0,1 \%$, ISO 9227 NSS 2000 h ± 100 h), l'épaisseur de la couche de NiO est stable à $10 \text{ nm} \pm 1 \text{ nm}$, et le taux de perte de poids n'est que de $0,05 \text{ mg/cm}^2 \pm 0,01 \text{ mg/cm}^2$, contre $0,12 \text{ mg/cm}^2$ pour le Co $\pm 0,01 \text{ mg/cm}^2$, ce qui représente une diminution d'environ $58 \% \pm 5 \%$. De plus, le coefficient de dilatation thermique de la phase de liaison à base de Ni ($13 \times 10^{-6} \text{ K}^{-1}$) correspond mieux à celui du WC ($5,2 \times 10^{-6} \text{ K}^{-1}$) qu'à celui du Co ($13 \times 10^{-6} \text{ K}^{-1}$), ce qui réduit les microfissures causées par le cyclage thermique ($\Delta T 500^\circ\text{C} \pm 10^\circ\text{C}$) et améliore indirectement la stabilité de la résistance à la corrosion.

8.3.1.3 Analyse microscopique et vérification de la résistance à la corrosion de la phase de liaison à base de Ni dans le carbure cimenté

au microscope électronique à balayage (MEB, résolution $< 0,1 \mu\text{m} \pm 0,01 \mu\text{m}$) ont montré que la couche de NiO du WC à base de Ni était uniformément répartie sur la surface, avec une épaisseur stable de $10 \text{ nm} \pm 1 \text{ nm}$, et aucun pelage ou fissure évident n'a été observé, tandis que la surface du WC à base de Co présentait une couche de Co_3O_4 lâche (épaisseur $> 0,5 \mu\text{m} \pm 0,1 \mu\text{m}$) accompagnée de microfissures (largeur $\sim 0,2 \mu\text{m} \pm 0,01 \mu\text{m}$). Français L'analyse par diffraction des rayons X (DRX) a confirmé la structure cristalline du NiO (cubique à faces centrées, $a = 4,17 \text{ \AA} \pm 0,01 \text{ \AA}$), et son intensité maximale ($2\theta \approx 37,2^\circ, 43,3^\circ$) indique une cristallinité élevée, ce qui améliore la protection de la couche de passivation. La spectroscopie dispersive en énergie (EDS) montre que la

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

teneur en Ni au joint de grain est d'environ 8%-10% $\pm$ 0,5%, ce qui est uniformément réparti, vérifiant sa bonne liaison d'interface avec le WC.

8.3.1.4 Analyse des facteurs affectant la résistance à la corrosion de la phase de liaison à base de Ni dans le carbure cémenté

La résistance à la corrosion de la phase liante à base de Ni est affectée par de nombreux facteurs et doit être entièrement optimisée pour obtenir les meilleures performances :

(1) Teneur en Ni

Lorsque la teneur en Ni est de 10 % $\pm$ 1 %, le courant de corrosion $i_{\text{corr}} < 10^{-6} \text{ A/cm}^2 \pm 10^{-7} \text{ A/cm}^2$ et le taux de perte de poids est contrôlé à 0,05 mg/cm² $\pm$ 0,01 mg/cm², et la dureté reste à HV 1800 $\pm$ 30. Cependant, lorsque la teneur en Ni dépasse 12 % $\pm$ 1 %, l'augmentation de la phase Ni conduit à une ténacité accrue (K_{IC} augmente de 5 % $\pm$ 1 %), mais la dureté diminue d'environ 10 % $\pm$ 2 % (jusqu'à HV 1620 $\pm$ 30), et le courant de corrosion augmente légèrement à $2 \times 10^{-6} \text{ A/cm}^2 \pm 10^{-7} \text{ A/cm}^2$ en raison de l'adoucissement intensifié de la phase Ni (dureté HV 150 $\pm$ 20).

(2) Taille des grains

la taille des grains de WC est de 0,51 $\mu\text{m} \pm 0,01 \mu\text{m}$, la densité des joints de grains est élevée ($> 10^4 \text{ mm}^2/\text{cm}^3 \pm 10^3 \text{ mm}^2/\text{cm}^3$) et le taux de perte de poids est faible ($< 0,05 \text{ mg/cm}^2 \pm 0,01 \text{ mg/cm}^2$), car les grains fins réduisent le chemin de pénétration du milieu corrosif. Lorsque la taille des grains augmente à 2 $\mu\text{m} \pm 0,01 \mu\text{m}$, la densité des joints de grains diminue et le taux de perte de poids augmente d'environ 20 % $\pm$ 5 % (à 0,06 mg/cm² $\pm$ 0,01 mg/cm²), la profondeur des piqûres augmente de 2 $\mu\text{m} \pm 0,5 \mu\text{m}$ à 3,5 $\mu\text{m} \pm 0,5 \mu\text{m}$.

(3) Température de frittage

Lorsqu'il est fritté à 1450°C $\pm$ 10°C, l'écart de distribution du Ni est $< 0,1\% \pm 0,02\%$, le courant de corrosion i_{corr} reste $< 10^{-6} \text{ A/cm}^2 \pm 10^{-7} \text{ A/cm}^2$ et le taux de perte de poids est stable. Si la température de frittage est augmentée à $> 1500^\circ\text{C} \pm 10^\circ\text{C}$, une ségrégation de Ni se produit (écart $> 0,5\% \pm 0,1\%$), et l'enrichissement en Ni aux joints de grains provoque une augmentation du courant de corrosion de 15% $\pm$ 3% (à $1,15 \times 10^{-6} \text{ A/cm}^2 \pm 10^{-7} \text{ A/cm}^2$), et le taux de perte de poids augmente à 0,07 mg/cm² $\pm$ 0,01 mg/cm².

(4) Environnement

Dans un environnement acide fort avec un pH $< 2 \pm 0,1$, la couche de NiO se dissout partiellement, le courant de corrosion i_{corr} augmente d'environ 30 % $\pm$ 5 % (jusqu'à $1,3 \times 10^{-6} \text{ A/cm}^2 \pm 10^{-7} \text{ A/cm}^2$) et le taux de perte de poids s'élève à 0,065 mg/cm² $\pm$ 0,01 mg/cm². Dans un brouillard salin avec une concentration en NaCl $> 5\% \pm 0,1\%$, l'augmentation de la concentration en Cl⁻ induit une corrosion par piqûres, et la zone de piqûres augmente de 20 % $\pm$ 5 % (de 0,01 mm² $\pm$ 0,001 mm² à 0,012 mm² $\pm$ 0,001 mm²), le taux de perte de poids augmente à 0,06 mg/cm² $\pm$ 0,01 mg/cm².

(5) Rugosité de surface

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

Lorsque la rugosité de surface $Ra < 0,05 \mu m \pm 0,01 \mu m$, il y a peu de défauts de surface, le courant de corrosion i_{corr} reste à un niveau faible ($< 10^{-6} A/cm^2 \pm 10^{-7} A/cm^2$), et le taux de perte de poids est $< 0,05 mg/cm^2 \pm 0,01 mg/cm^2$. Si $Ra > 0,1 \mu m \pm 0,01 \mu m$, les microfissures et les piqûres augmentent, le courant de corrosion augmente de $10 \% \pm 2 \%$ (à $1,1 \times 10^{-6} A/cm^2 \pm 10^{-7} A/cm^2$), et la profondeur des piqûres augmente à $4 \mu m \pm 0,5 \mu m$.

Français Par exemple, un échantillon de WC-12Ni présente une ségrégation de Ni (écart de $0,6 \% \pm 0,1 \%$) en raison de la température de frittage élevée ($1500^\circ C \pm 10^\circ C$), et le taux de perte de poids dans un environnement de brouillard salin NaCl $5 \% \pm 0,1 \%$ est de $0,07 mg/cm^2 \pm 0,01 mg/cm^2$, et le courant de corrosion i_{corr} est de $1,2 \times 10^{-6} A/cm^2 \pm 10^{-7} A/cm^2$. Le taux de perte de poids du WC-10Ni optimisé (fritté à $1450^\circ C \pm 10^\circ C$, $Ra < 0,05 \mu m \pm 0,01 \mu m$) n'est que de $0,05 mg/cm^2 \pm 0,01 mg/cm^2$, $i_{corr} < 10^{-6} A/cm^2 \pm 10^{-7} A/cm^2$, résistance à la corrosion améliorée d'environ $29 \% \pm 5 \%$.

8.3.1.5 Optimisation du procédé de préparation de la phase liante à base de Ni

Pour obtenir une perte de poids $< 0,05 mg/cm^2 \pm 0,01 mg/cm^2$ et un courant de corrosion $i_{corr} < 10^{-6} A/cm^2 \pm 10^{-7} A/cm^2$, le procédé de préparation du carbure cémenté WC à base de nickel doit être contrôlé avec précision pour exploiter pleinement ses avantages en termes de résistance à la corrosion. Les stratégies d'optimisation recommandées incluent les aspects suivants :

(1) Optimisation des ingrédients

Des poudres de nickel de haute pureté (pureté $> 99,9 \% \pm 0,01 \%$) et de WC (granulométrie $0,51 \mu m \pm 0,01 \mu m$) sont sélectionnées, et la teneur en nickel est contrôlée entre 8% et $10 \% \pm 1 \%$. Cette gamme assure un équilibre entre résistance à la corrosion et propriétés mécaniques. Une teneur en Ni trop élevée ($> 12 \% \pm 1 \%$) entraînera une augmentation de la phase Ni, une diminution de la dureté d'environ $10 \% \pm 2 \%$ (jusqu'à $HV 1620 \pm 30$) et une augmentation de la ténacité de $5 \% \pm 1 \%$ (K_{Ic} augmente à $12,6 MPa \cdot m^{1/2} \pm 0,5 MPa \cdot m^{1/2}$) mais le courant de corrosion augmente légèrement (jusqu'à $2 \times 10^{-6} A/cm^2 \pm 10^{-7} A/cm^2$); Une valeur trop faible ($< 8 \% \pm 1 \%$) conduit à une dureté insuffisante ($< HV 1600 \pm 30$) et à une résistance à la corrosion diminuée ($i_{corr} > 2 \times 10^{-6} A/cm^2 \pm 10^{-7} A/cm^2$). Les grains fins de WC ($0,51 \mu m \pm 0,01 \mu m$) réduisent la pénétration des milieux corrosifs en augmentant la densité des joints de grains ($> 10^4 mm^2/cm^3 \pm 10^3 mm^2/cm^3$), et le taux de perte de poids est contrôlé à $< 0,05 mg/cm^2 \pm 0,01 mg/cm^2$.

(2) Procédé de broyage à boulets

Le broyage à billes humides (le milieu est l'éthanol anhydre, 40 heures ± 1 heure, rapport billes/matériau $10:1 \pm 0,5$) est utilisé pour assurer un mélange uniforme des poudres, un écart de distribution granulométrique $< 0,02 \mu m \pm 0,01 \mu m$, réduire les micro-défauts (tels que les pores, l'agglomération), fournir une matrice homogène pour le frittage ultérieur et réduire indirectement la sensibilité à la corrosion.

(3) Frittage sous vide

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

à $1450^{\circ}\text{C} \pm 10^{\circ}\text{C}$, pression $< 10^{-3} \text{ Pa} \pm 10^{-4} \text{ Pa}$, temps de maintien $1 \text{ h} \pm 0,1 \text{ h}$, densité atteinte $99,5\% \pm 0,1\%$, porosité $< 0,1\% \pm 0,02\%$. Cette température assure une distribution uniforme du Ni (écart $< 0,1\% \pm 0,02\%$), évitant la ségrégation ($> 0,5\% \pm 0,1\%$ à $> 1500^{\circ}\text{C} \pm 10^{\circ}\text{C}$, augmentation de i_{corr} $15\% \pm 3\%$). L'environnement sous vide poussé réduit l'infiltration d'oxygène, empêche la formation prématurée de NiO ou une distribution inégale et maintient la perte de poids à un faible niveau.

(4) Post-traitement

Le pressage isostatique à chaud (HIP, $1200^{\circ}\text{C} \pm 10^{\circ}\text{C}$, $200 \text{ MPa} \pm 10 \text{ MPa}$, $1 \text{ heure} \pm 0,1 \text{ heure}$) a été utilisé pour éliminer les pores résiduels, améliorer encore la densité (densité augmentée à $99,7\% \pm 0,1\%$), réduire le chemin de pénétration des milieux corrosifs et réduire la profondeur des piqûres de $3 \mu\text{m} \pm 0,5 \mu\text{m}$ à $< 2 \mu\text{m} \pm 0,5 \mu\text{m}$.

(5) Traitement de surface

Français La rugosité de surface (Ra) a été contrôlée à moins de $0,05 \mu\text{m} \pm 0,01 \mu\text{m}$ par polissage mécanique de précision, ce qui a réduit les microfissures et les piqûres de surface. Un nettoyage par ultrasons ($40 \text{ kHz} \pm 1 \text{ kHz}$, $10 \text{ min} \pm 1 \text{ min}$) a ensuite été utilisé pour éliminer les contaminants résiduels ($< 0,1\% \pm 0,02\%$) et réduire la zone de piqûres de $20\% \pm 5\%$ (de $0,012 \text{ mm}^2 \pm 0,001 \text{ mm}^2$ à $0,0096 \text{ mm}^2 \pm 0,001 \text{ mm}^2$), le courant de corrosion i_{corr} reste $< 10^{-6} \text{ A/cm}^2 \pm 10^{-7} \text{ A/cm}^2$.

(6) Introduction d'additifs

Français L'ajout d'une petite quantité de Cr_3C_2 ($0,2\% \pm 0,01\%$) améliore encore la résistance à la corrosion. Le Cr_3C_2 forme une couche de Cr_2O_3 (épaisseur $\sim 0,1 \mu\text{m} \pm 0,05 \mu\text{m}$) à haute température, qui agit en synergie avec la couche de NiO pour réduire le courant de corrosion d'environ $10\% \pm 2\%$ (de $10^{-6} \text{ A/cm}^2 \pm 10^{-7} \text{ A/cm}^2$ à $9 \times 10^{-7} \text{ A/cm}^2 \pm 10^{-8} \text{ A/cm}^2$), et le taux de perte de poids reste $< 0,05 \text{ mg/cm}^2 \pm 0,01 \text{ mg/cm}^2$. Cr_3C_2 affine également la taille des grains (de $0,6 \mu\text{m} \pm 0,01 \mu\text{m}$ à $0,51 \mu\text{m} \pm 0,01 \mu\text{m}$) et améliore la résistance des joints de grains ($> 200 \text{ MPa} \pm 20 \text{ MPa}$).

L'optimisation de ces paramètres de processus assure la liaison uniforme de la phase liante à base de Ni et du WC, et la résistance aux joints de grains est augmentée à $> 200 \text{ MPa} \pm 20 \text{ MPa}$, ce qui améliore considérablement la résistance à la corrosion et à la fatigue du matériau tout en maintenant une dureté élevée ($\text{HV } 1800 \pm 30$) et une ténacité ($K_{\text{IC}} 12 \text{ MPa} \cdot \text{m}^{1/2} \pm 0,5 \text{ MPa} \cdot \text{m}^{1/2}$).

8.3.1.6 Spécification d'essai pour la phase de liaison à base de Ni du carbure cémenté

Les spécifications d'essai des phases de liaison à base de nickel du carbure cémenté visent à évaluer sa résistance à la corrosion et ses propriétés mécaniques. Les normes suivantes sont recommandées :

(1) Test au brouillard salin

Selon la norme ISO 9227 NSS, les conditions sont une solution de NaCl à $5\% \pm 0,1\%$, une température de $35^{\circ}\text{C} \pm 2^{\circ}\text{C}$, une durée de $2\,000 \text{ heures} \pm 100 \text{ heures}$, mesurer la perte de poids

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

(cible $< 0,05 \text{ mg/cm}^2 \pm 0,01 \text{ mg/cm}^2$) et la profondeur des piqûres (cible $< 3 \text{ } \mu\text{m} \pm 0,5 \text{ } \mu\text{m}$).

(2) Essai d'immersion dans l'acide

dans $0,1 \text{ M H}_2\text{SO}_4$ (pH $1 \pm 0,1$) pendant $100 \text{ heures} \pm 10 \text{ heures}$ et perte de poids d'essai (cible $< 0,05 \text{ mg/cm}^2 \pm 0,01 \text{ mg/cm}^2$) et densité de courant de corrosion (i_{corr} , cible $< 10^{-6} \text{ A/cm}^2 \pm 10^{-7} \text{ A/cm}^2$).

(3) Essais électrochimiques

Un système à trois électrodes (électrode de travail : WC à base de Ni, électrode de référence : électrode de calomel saturé, électrode auxiliaire : électrode de platine) a été utilisé pour mesurer le potentiel de corrosion (E_{corr} , cible $\sim 0,1 \text{ V} \pm 0,02 \text{ V vs. SCE}$) et les courbes de polarisation à une vitesse de balayage de $1 \text{ mV/s} \pm 0,1 \text{ mV/s}$.

la phase de liaison à base de carbure cimenté Ni

(1) Essai de dureté

Selon la norme ISO 3878, en utilisant un duromètre Vickers, charge $30 \text{ kg} \pm 1 \text{ kg}$, température d'essai $25^\circ\text{C} \pm 1^\circ\text{C}$, dureté cible $> \text{HV } 1800 \pm 30$.

(2) Essai de ténacité à la rupture

Conformément à la norme ASTM E399, en utilisant la méthode de la poutre à encoche unique (SENB), température d'essai $25^\circ\text{C} \pm 1^\circ\text{C}$, cible $K_{Ic} > 12 \text{ MPa}\cdot\text{m}^{1/2} \pm 0,5 \text{ MPa}\cdot\text{m}^{1/2}$.

(3) Test de performance à haute température

La résistance à la flexion a été testée à $1000^\circ\text{C} \pm 10^\circ\text{C}$ en utilisant la méthode de flexion en trois points selon la norme ISO 178 (cible $> 2000 \text{ MPa} \pm 100 \text{ MPa}$).

8.3.1.8 Analyse microscopique de la phase de liaison à base de Ni dans le carbure cimenté

Observation au MEB

Résolution $< 0,1 \text{ } \mu\text{m} \pm 0,01 \text{ } \mu\text{m}$, analyse de l'épaisseur de la couche NiO (cible $10 \text{ nm} \pm 1 \text{ nm}$) et des défauts de surface.

Analyse XPS

Le pic Ni 2p (cible $854 \text{ eV} \pm 0,1 \text{ eV}$) a été testé pour confirmer la formation de NiO.

Analyse EDS

Mesurer la distribution du Ni aux joints de grains (cible $8\%-10\% \pm 0,5\%$).

Le test doit être réalisé dans des conditions de laboratoire standard, avec un échantillon de $10 \text{ mm} \times 10 \text{ mm} \times 5 \text{ mm} \pm 0,1 \text{ mm}$ et répété ≥ 3 fois pour garantir la fiabilité des données.

8.3.1.9 Applications techniques de la phase liante en carbure cimenté à base de Ni

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

Grâce à son excellente résistance à la corrosion et à ses excellentes propriétés mécaniques, la phase de liaison à base de carbure cimenté Ni a démontré des avantages significatifs dans les applications techniques dans divers environnements corrosifs et à haute température. Voici ses principaux domaines d'application et ses performances, ainsi que des exemples concrets et des données :

(1) Ingénierie maritime

cm²) dans le brouillard salin (NaCl 5 % ± 0,1 %) et l'eau de mer. ± 0,01 mg/cm²) et une résistance élevée à la corrosion (courant de corrosion $i_{corr} < 10^{-6} \text{ A/cm}^2 \pm 10^{-7} \text{ A/cm}^2$), il est largement utilisé dans les stabilisateurs et les outils de coupe de forage en haute mer. Dans le forage en haute mer, la durée de vie des stabilisateurs en WC-10Ni dépasse 3 ans ± 0,3 an, ce qui est environ 100 % ± 5 % supérieur à celui du WC-10Co traditionnel (1,5 an ± 0,2 an), et le coût de maintenance causé par la corrosion est réduit d'environ 40 % ± 5 %. Sa dureté élevée (HV 1800 ± 30) et sa ténacité ($K_{IC} 12 \text{ MPa} \cdot \text{m}^{1/2} \pm 0,5 \text{ MPa} \cdot \text{m}^{1/2}$) assurent une efficacité de coupe sous haute pression (> 20 MPa ± 2 MPa) et haute température (> 500°C ± 10°C).

(2) Canalisations et équipements chimiques

Français Dans un environnement acide (pH < 2 ± 0,1, tel que 0,1 MH₂SO₄) , le taux de perte de poids du carbure cimenté WC à base de Ni n'est que de 0,06 mg/cm² en raison de la protection de sa couche de passivation NiO (épaisseur ~10 nm ± 1 nm). ± 0,01 mg/ cm², meilleur que l'acier inoxydable (taux de perte de poids ~0,1 mg/cm² ± 0,01 mg/cm²) . Il est utilisé pour les revêtements résistants à la corrosion des vannes et des pompes de pipelines chimiques, avec une durée de vie de > 2 ans ± 0,2 an, ce qui est environ 100 % ± 5 % plus long que les matériaux traditionnels (tels que l'acier inoxydable 304, durée de vie ~1 an ± 0,1 an). Dans les réacteurs chimiques contenant des chlorures (tels que HCl), le WC-10Ni maintient la résistance aux piqûres (profondeur de piqûre < 3 µm ± 0,5 µm) , réduisant ainsi le risque de fuite de l'équipement.

(3) Industrie papetière

Les équipements de fabrication de papier (tels que les rouleaux et lames de broyage) sont soumis à des environnements contenant du chlorure (NaCl > 5 % ± 0,1 %) et à des températures élevées (> 400 °C ± 10 °C). Le carbure cimenté WC à base de Ni est un choix idéal en raison de son faible courant de corrosion ($i_{corr} < 10^{-6} \text{ A/cm}^2 \pm 10^{-7} \text{ A/cm}^2$) et de sa grande résistance à l'usure (dureté > HV 1800 ± 30). La perte de poids des rouleaux de broyage en WC-10Ni n'est que de 0,05 mg/cm² après 5 000 h ± 500 h de fonctionnement continu. ± 0,01 mg/ cm² , profondeur d'usure de surface < 10 µm ± 1 µm , comparé au WC-10Co (taux de perte de poids 0,12 mg/ cm² ± 0,01 mg/ cm² , profondeur d'usure 20 µm ± 2 µm) améliore la durabilité d'environ 50 % ± 5 %, réduisant la fréquence de remplacement et les coûts de production.

(4) Équipements aéronautiques et énergétiques

Dans les composants de moteurs aérospatiaux (tels que les aubes de turbine) et les buses de turbine à gaz, le carbure cimenté WC à base de Ni (tel que WC-10Ni avec Cr₃C₂ 0,2 % ± 0,01 %) présente une longueur de fissure de fatigue thermique < 0,04 mm ± 0,01 mm et un taux de perte de poids < 0,25 mg/cm² dans des conditions de 900°C ± 10°C et de cyclage thermique (ΔT 500°C ± 10°C). ±

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

0,05 mg/cm², durée de vie > 5000 heures ± 500 heures, meilleure que les 3000 heures ± 300 heures non optimisées. Sa stabilité thermique élevée (dureté > HV 1600 ± 30) et sa résistance à l'oxydation lui permettent de bien fonctionner dans des environnements corrosifs à haute température (tels que les atmosphères SO₂), réduisant le taux de défaillance causé par la fissuration thermique d'environ 45 % ± 5 %.

8.3.1.10 Avantages d'application et expansion du carbure cimenté à base de Ni

Français L'avantage d'application technique du carbure cimenté WC à base de Ni réside dans ses performances globales : résistance à la corrosion améliorée de 60 % ± 5 %, dureté élevée (HV 1800 ± 30) et ténacité (K_{IC} 12 MPa·m^{1/2} ± 0,5 MPa·m^{1/2}) et stabilité à 1000 °C ± 10 °C. Ces caractéristiques en font un substitut potentiel aux matériaux traditionnels à base de Co et à l'acier inoxydable dans des environnements extrêmes (tels que la haute pression en haute mer, l'industrie chimique acide et l'aviation à haute température). En présence de vapeur d'eau (humidité > 50 % ± 5 %) ou de gradients de température plus élevés (ΔT 600 °C ± 10 °C), la combinaison de revêtements multicouches (par exemple TiN / Al₂O₃, épaisseur 5-20 µm ± 0,1 µm) peut encore améliorer les performances et s'étendre aux applications à ultra-haute température (> 1100 °C ± 10 °C) ou à nombre de cycles élevé (> 10⁶ fois ± 10⁴ fois), telles que les dispositifs énergétiques de nouvelle génération.

Avantages économiques et environnementaux

L'utilisation de WC à base de Ni réduit considérablement les coûts de maintenance. Par exemple, le coût annuel de maintenance des composants de forage offshore est réduit de 40 % ± 5 %, et l'efficacité des composants aéronautiques est augmentée de 20 % ± 3 %. Cependant, le Ni est relativement cher (environ 1,5 à 2 fois celui du Co), et les coûts doivent être maîtrisés en optimisant la teneur en Ni (8 à 10 % ± 1 %) et les procédés (comme le post-traitement HIP). Sur le plan environnemental, sa durabilité réduit la quantité de déchets de matériaux, ce qui répond aux exigences du développement durable.

Le carbure cimenté WC à base de nickel est particulièrement performant dans les domaines de l'ingénierie navale, des pipelines chimiques, de l'industrie papetière et des équipements aéronautiques. Sa perte de poids est inférieure à 0,06 mg/cm² ± 0,01 mg/cm² et sa durée de vie est prolongée de 50 à 100 % ± 5 %. Sa résistance à la corrosion et sa stabilité à haute température répondent à diverses exigences techniques, et son application pourrait être étendue ultérieurement aux revêtements et aux alliages.

8.3.2 Introduction d'additifs Cr₃C₂ dans le carbure cimenté

8.3.2.1 Principe et aperçu technique de l'introduction d'additifs Cr₃C₂ dans le carbure cimenté

Les additifs Cr₃C₂ au carbure cimenté améliorent considérablement la résistance à l'oxydation et

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

aux températures élevées du carbure cémenté, notamment dans les environnements à haute température ($1\,000\text{ °C} \pm 10\text{ °C}$) et corrosifs (tels que les atmosphères contenant de l'oxygène ou du chlorure). La quantité d'ajout recommandée est de $0,2\text{ \%}$ à $0,5\text{ \%} \pm 0,01\text{ \%}$. Cr_3C_2 réagit avec l'oxygène à haute température pour former une couche protectrice dense de Cr_2O_3 (épaisseur $\sim 0,1\text{--}0,2\text{ }\mu\text{m} \pm 0,05\text{ }\mu\text{m}$, densité $\sim 5,2\text{ g/cm}^3 \pm 0,1\text{ g/cm}^3$), isole efficacement l'oxygène et les milieux corrosifs et contrôle le gain de poids à $< 0,3\text{ mg/cm}^2 \pm 0,05\text{ mg/cm}^2$, mieux que $0,5\text{ mg/cm}^2$ d'échantillons non dopés $\pm 0,05\text{ mg/cm}^2$. Cette couche protectrice réduit le taux d'oxydation (de $0,4\text{ mg/cm}^2 \cdot \text{h} \pm 0,05\text{ mg/cm}^2 \cdot \text{h}$ à $< 0,2\text{ mg/cm}^2 \cdot \text{h} \pm 0,05\text{ mg/cm}^2 \cdot \text{h}$) et agit en synergie avec la couche NiO de la phase de liaison à base de Ni pour réduire davantage le courant de corrosion (i_{corr} de $10^{-6}\text{ Cr}_3\text{C}_2$ améliore également la résistance aux joints de grains ($> 200\text{ MPa} \pm 20\text{ MPa}$) en affinant les grains de WC (de $0,6\text{ }\mu\text{m} \pm 0,01\text{ }\mu\text{m}$ à $0,51\text{ }\mu\text{m} \pm 0,01\text{ }\mu\text{m}$), tout en maintenant la dureté ($> \text{HV } 1500 \pm 30$) et la ténacité ($K_{\text{IC}} > 12\text{ MPa}\cdot\text{m}^{1/2} \pm 0,5\text{ MPa}\cdot\text{m}^{1/2}$), ce qui le rend adapté aux applications à haute température et à forte charge, telles que les aubes de turbines d'aviation et les tuyères de turbines à gaz. De plus, la stabilité à haute température du Cr_3C_2 (point de fusion $1890\text{ °C} \pm 10\text{ °C}$) lui permet de se ramollir moins que la base Co à $1000\text{ °C} \pm 10\text{ °C}$ (chute de dureté $< 5\text{ \%} \pm 1\text{ \%}$), ce qui améliore sa durabilité à long terme.

8.3.2.2 Analyse du mécanisme de résistance à l'oxydation et à la corrosion des additifs en carbure cémenté Cr_3C_2

L'addition de Cr_3C_2 provient de sa réaction chimique et de sa régulation de la microstructure. Dans un environnement oxydant à $1\,000\text{ °C} \pm 10\text{ °C}$, Cr_3C_2 réagit ($4\text{Cr}_3\text{C}_2 + 13\text{O}_2 \rightarrow 6\text{Cr}_2\text{O}_3 + 8\text{CO}$, $\Delta G < -1\,000\text{ kJ/mol} \pm 50\text{ kJ/mol}$) pour former une couche de Cr_2O_3 , dont le faible coefficient de diffusion de l'oxygène ($D_{\text{O}} \approx 10^{-14}\text{ cm}^2/\text{s} \pm 10^{-15}\text{ cm}^2/\text{s}$) bloque efficacement la pénétration de l'oxygène, et le gain de poids est réduit de $0,5\text{ mg/cm}^2$ à $1,5\text{ mg/cm}^2 \pm 0,05\text{ mg/cm}^2$ jusqu'à $< 0,3\text{ mg/cm}^2 \pm 0,05\text{ mg/cm}^2$, la résistance à l'oxydation est améliorée d'environ $40\text{ \%} \pm 5\text{ \%}$. En milieu acide (tel que $0,1\text{ M H}_2\text{SO}_4$, $\text{pH } 1 \pm 0,1$) ou brouillard salin ($\text{NaCl } 5\text{ \%} \pm 0,1\text{ \%}$), la couche de Cr_2O_3 et NiO . Les deux couches forment ensemble une structure de double protection, le courant de corrosion i_{corr} est réduit à $9 \times 10^{-7}\text{ A/cm}^2 \pm 10^{-8}\text{ A/cm}^2$, et le taux de perte de poids est maintenu à $< 0,05\text{ mg/cm}^2 \pm 0,01\text{ mg/cm}^2$, contre $0,07\text{ mg/cm}^2 \pm 0,01\text{ mg/cm}^2$ sans additif $\pm 0,01\text{ mg/cm}^2$ est réduit d'environ $29\text{ \%} \pm 5\text{ \%}$. De plus, Cr_3C_2 affine les grains et renforce la liaison des joints de grains, réduit la croissance des fissures de fatigue thermique (de $0,05\text{ mm} \pm 0,01\text{ mm}$ à $0,03\text{ mm} \pm 0,01\text{ mm}$) et présente un degré élevé de correspondance du coefficient de dilatation thermique ($10 \times 10^{-6}\text{ K}^{-1}$) avec le WC , réduisant la concentration de contraintes causée par le cycle thermique ($\Delta T\ 500\text{ °C} \pm 10\text{ °C}$).

8.3.2.3 Analyse microscopique et vérification de l'introduction d' additifs Cr_3C_2 dans le carbure cémenté

au microscope électronique à balayage (MEB, résolution $< 0,1\text{ }\mu\text{m} \pm 0,01\text{ }\mu\text{m}$) ont montré qu'après l'ajout de Cr_3C_2 , la couche de Cr_2O_3 était uniformément répartie sur la surface, avec une épaisseur stable à $0,1\text{--}0,2\text{ }\mu\text{m} \pm 0,05\text{ }\mu\text{m}$, sans pelage ni fissures évidents, tandis que des trous d'oxydation

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

(diamètre $\sim 0,3 \mu\text{m} \pm 0,01 \mu\text{m}$) apparaissent à la surface de l'échantillon sans ajout. L'analyse par diffraction des rayons X (DRX) a confirmé la structure cristalline hexagonale de Cr_2O_3 ($a = 4,96 \text{ \AA} \pm 0,01 \text{ \AA}$, $c = 13,58 \text{ \AA} \pm 0,01 \text{ \AA}$), l'intensité du pic ($2\theta \approx 33,6^\circ, 36,2^\circ$) indique une cristallinité élevée, ce qui améliore la stabilité de la couche protectrice. La spectroscopie dispersive en énergie (EDS) montre que la teneur en Cr au joint de grain est d'environ $0,5\%-1\% \pm 0,1\%$, ce qui est uniformément réparti, vérifiant sa bonne liaison d'interface avec les phases WC et Ni. La spectroscopie photoélectronique à rayons X (XPS) a détecté le pic Cr 2p (environ $576,5 \text{ eV} \pm 0,1 \text{ eV}$), qui correspond au pic O 1s ($530 \text{ eV} \pm 0,1 \text{ eV}$), confirmant la formation de Cr_2O_3 .

8.3.2.4 Analyse des facteurs affectant les performances des additifs en carbure cémenté Cr_3C_2

des additifs en carbure cémenté Cr_3C_2 est affectée par de nombreux facteurs et doit être contrôlée avec précision :

(1) Montant de l'ajout

Lorsque la teneur en Cr_3C_2 est de $0,2\% \pm 0,01\%$, le gain de poids est $< 0,3 \text{ mg/cm}^2 \pm 0,05 \text{ mg/cm}^2$, i_{corr} diminue d'environ $10\% \pm 2\%$ (à $9 \times 10^{-7} \text{ A/cm}^2 \pm 10^{-8} \text{ A/cm}^2$). Si la teneur dépasse $0,5\% \pm 0,01\%$, une phase η (phase composite WC-Cr-Co) peut se former, la dureté diminue d'environ $5\% \pm 1\%$ (à HV 1425 ± 30) et la ténacité augmente de $3\% \pm 1\%$ (K_{IC} augmente à $12,4 \text{ MPa} \cdot \text{m}^{1/2} \pm 0,5 \text{ MPa} \cdot \text{m}^{1/2}$), mais i_{corr} augmente à $1,1 \times 10^{-6} \text{ A/cm}^2 \pm 10^{-7} \text{ A/cm}^2$.

(2) Taille des grains

la taille des grains de WC est de $0,51 \mu\text{m} \pm 0,01 \mu\text{m}$, Cr_3C_2 est uniformément réparti et le taux de perte de poids est faible ($< 0,05 \text{ mg/cm}^2 \pm 0,01 \text{ mg/cm}^2$). Si la taille des grains augmente à $2 \mu\text{m} \pm 0,01 \mu\text{m}$, la couche de Cr_2O_3 est discontinue et le taux de perte de poids augmente de $15\% \pm 3\%$ (à $0,055 \text{ mg/cm}^2 \pm 0,01 \text{ mg/cm}^2$), la profondeur de piqûres augmente de $2 \mu\text{m} \pm 0,5 \mu\text{m}$ à $3 \mu\text{m} \pm 0,5 \mu\text{m}$.

(3) Température de frittage

Lorsqu'il est fritté à $1450^\circ\text{C} \pm 10^\circ\text{C}$, Cr_3C_2 Solution solide uniforme, gain de poids $< 0,3 \text{ mg/cm}^2 \pm 0,05 \text{ mg/cm}^2$. Si la température monte à $> 1550^\circ\text{C} \pm 10^\circ\text{C}$, Cr se volatilise (perte $> 0,1\% \pm 0,02\%$), l'épaisseur de la couche Cr_2O_3 diminue ($< 0,1 \mu\text{m} \pm 0,05 \mu\text{m}$) et i_{corr} augmente de $10\% \pm 2\%$ (à $1,1 \times 10^{-6} \text{ A/cm}^2 \pm 10^{-7} \text{ A/cm}^2$).

(4) Environnement

Français Dans un acide fort avec un $\text{pH} < 2 \pm 0,1$, la couche de Cr_2O_3 s'est partiellement dissoute, i_{corr} a augmenté de $20\% \pm 3\%$ (à $1,08 \times 10^{-6} \text{ A/cm}^2 \pm 10^{-7} \text{ A/cm}^2$) et le taux de perte de poids a augmenté à $0,06 \text{ mg/cm}^2 \pm 0,01 \text{ mg/cm}^2$. Dans un brouillard salin NaCl $> 5\% \pm 0,1\%$, Cl^- accélère la corrosion de Cr_2O_3 et la zone de piqûres augmente de $15\% \pm 3\%$ (de $0,01 \text{ mm}^2 \pm 0,001 \text{ mm}^2$ à $0,0115 \text{ mm}^2 \pm 0,001 \text{ mm}^2$).

(5) Rugosité de surface

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

$R_a < 0,05 \mu\text{m} \pm 0,01 \mu\text{m}$, la couche de Cr_2O_3 est intacte et i_{corr} reste faible ($< 10^{-6} \text{ A/cm}^2 \pm 10^{-7} \text{ A/cm}^2$). Si $R_a > 0,1 \mu\text{m} \pm 0,01 \mu\text{m}$, les défauts de surface augmentent, i_{corr} augmente de $8\% \pm 2\%$ ($1,08 \times 10^{-6} \text{ A/cm}^2 \pm 10^{-7} \text{ A/cm}^2$) et la profondeur des piqûres augmente à $3,5 \mu\text{m} \pm 0,5 \mu\text{m}$.

Par exemple, un échantillon de WC-10Ni-0,6 % Cr_3C_2 présentait un taux de perte de poids de $0,08 \text{ mg/cm}^2$ dans le brouillard salin en raison de la volatilisation du Cr provoquée par la température de frittage élevée ($1550^\circ\text{C} \pm 10^\circ\text{C}$). $\pm 0,01 \text{ mg/cm}^2$, i_{corr} a augmenté à $1,2 \times 10^{-6} \text{ A/cm}^2 \pm 10^{-7} \text{ A/cm}^2$. Le taux de perte de poids du WC-10Ni-0,2% Cr_3C_2 optimisé ($1450^\circ\text{C} \pm 10^\circ\text{C}$, $R_a < 0,05 \mu\text{m} \pm 0,01 \mu\text{m}$) n'était que de $0,03 \text{ mg/cm}^2 \pm 0,01 \text{ mg/cm}^2$. $i_{\text{corr}} < 9 \times 10^{-7} \text{ A/cm}^2 \pm 10^{-8} \text{ A/cm}^2$, capacité antioxydante augmentée d'environ $40\% \pm 5\%$.

8.3.2.5 Optimisation du procédé de préparation des additifs en carbure cémenté Cr_3C_2

Pour obtenir un gain de masse $< 0,3 \text{ mg/cm}^2 \pm 0,05 \text{ mg/cm}^2$ et une $i_{\text{corr}} < 10^{-6} \text{ A/cm}^2 \pm 10^{-7} \text{ A/cm}^2$, l'introduction d'additifs Cr_3C_2 doit être optimisée en coordination avec le procédé de préparation. Les stratégies recommandées incluent :

(1) Optimisation des ingrédients

Poudre de Cr_3C_2 de haute pureté (pureté $> 99,5\% \pm 0,01\%$, granulométrie $0,5 \mu\text{m} \pm 0,01 \mu\text{m}$) est sélectionnée et mélangée avec du WC (granulométrie $0,51 \mu\text{m} \pm 0,01 \mu\text{m}$) et de la poudre de Ni ($8\% - 10\% \pm 1\%$). La teneur en Cr_3C_2 est contrôlée à $0,2\% - 0,5\% \pm 0,01\%$. Une teneur excessive ($> 0,5\% \pm 0,01\%$) peut induire une phase η et réduire la dureté de $5\% \pm 1\%$, tandis qu'une teneur trop faible ($< 0,2\% \pm 0,01\%$) a un effet antioxydant insuffisant (gain de poids $> 0,4 \text{ mg/cm}^2$). $\pm 0,05 \text{ mg/cm}^2$.

(2) Procédé de broyage à boulets

Le broyage à billes humides (milieu : éthanol anhydre, $40 \text{ h} \pm 1 \text{ h}$, rapport billes/matériau : $10:1 \pm 0,5$) a été utilisé pour assurer une dispersion uniforme de Cr_3C_2 , avec un écart de distribution granulométrique de $< 0,02 \mu\text{m} \pm 0,01 \mu\text{m}$, réduire l'agglomération ($< 0,1\% \pm 0,02\%$) et fournir une matrice homogène pour la formation de la couche Cr_2O_3 .

(3) Frittage sous vide

Frittage à $1450^\circ\text{C} \pm 10^\circ\text{C}$, pression $< 10^{-3} \text{ Pa} \pm 10^{-4} \text{ Pa}$, temps de maintien $1 \text{ heure} \pm 0,1 \text{ heure}$, densité atteignant $99,5\% \pm 0,1\%$, porosité $< 0,1\% \pm 0,02\%$. Cette température assure que la solution solide Cr_3C_2 forme une couche uniforme de Cr_2O_3 . À $> 1550^\circ\text{C} \pm 10^\circ\text{C}$, le Cr se volatilise, ce qui entraîne une couche protectrice incomplète (épaisseur $< 0,1 \mu\text{m} \pm 0,05 \mu\text{m}$).

(4) Post-traitement

des milieux oxydants et augmenter l'épaisseur de la couche de Cr_2O_3 à $0,2 \mu\text{m} \pm 0,05 \mu\text{m}$.

(5) Traitement de surface

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

Le Ra a été contrôlé à $0,05 \mu\text{m} \pm 0,01 \mu\text{m}$ par polissage de précision, et les oxydes de surface ($< 0,1 \% \pm 0,02 \%$) ont été éliminés par nettoyage par ultrasons ($40 \text{ kHz} \pm 1 \text{ kHz}$, $10 \text{ min} \pm 1 \text{ min}$), et la zone de piqûres a été réduite de $15 \% \pm 3 \%$ (de $0,011 \text{ mm}^2$ à $0,01 \text{ mm}^2$) . $\pm 0,001 \text{ mm}^2$ jusqu'à $0,00935 \text{ mm}^2 \pm 0,001 \text{ mm}^2$) , i_{corr} reste $< 10^{-6} \text{ A/cm}^2 \pm 10^{-7} \text{ A/cm}^2$.

(6) Optimisation de la dispersion additive

L'alliage mécanique (MA, $200 \text{ tr/min} \pm 10 \text{ tr/min}$, $10 \text{ h} \pm 0,5 \text{ h}$) a été utilisé pour améliorer la liaison interfaciale entre les phases Cr_3C_2 et WC/Ni , réduire la ségrégation ($< 0,05 \% \pm 0,01 \%$) et améliorer l'uniformité de la couche Cr_2O_3 .

Ces procédés assurent une distribution uniforme de Cr_3C_2 , une résistance aux joints de grains $> 200 \text{ MPa} \pm 20 \text{ MPa}$ et une dureté ($> \text{HV } 1500 \pm 30$) et une ténacité ($K_{\text{Ic}} > 12 \text{ MPa} \cdot \text{m}^{1/2} \pm 0,5 \text{ MPa} \cdot \text{m}^{1/2}$) maintenues.

8.3.2.6 Comparaison des performances et des cas d'ingénierie additive en carbure cémenté Cr_3C_2

En prenant comme exemples $\text{WC-10Ni-0,2\%Cr}_3\text{C}_2$ et WC-10Ni , après oxydation à $1000^\circ\text{C} \pm 10^\circ\text{C}$ pendant $100 \text{ heures} \pm 10 \text{ heures}$, l'augmentation de masse de l'échantillon avec Cr_3C_2 ajouté n'est que de $0,25 \text{ mg/cm}^2 \pm 0,05 \text{ mg/cm}^2$, $i_{\text{corr}} < 9 \times 10^{-7} \text{ A/cm}^2 \pm 10^{-8} \text{ A/cm}^2$, comparé à $0,5 \text{ mg/cm}^2$ sans ajout $\pm 0,05 \text{ mg/cm}^2$ et $1,1 \times 10^{-6} \text{ A/cm}^2 \pm 10^{-7} \text{ A/cm}^2$, et la résistance à l'oxydation est améliorée de $50 \% \pm 5 \%$. Français Dans l'essai au brouillard salin ($\text{NaCl } 5 \% \pm 0,1 \%$, $2\,000 \text{ h} \pm 100 \text{ h}$), le taux de perte de poids est réduit à $0,03 \text{ mg/cm}^2 \pm 0,01 \text{ mg/cm}^2$, profondeur de piqûre $< 2 \mu\text{m} \pm 0,5 \mu\text{m}$, mieux que $0,07 \text{ mg/cm}^2$ sans ajout $\pm 0,01 \text{ mg/cm}^2$ et $3,5 \mu\text{m} \pm 0,5 \mu\text{m}$. Dans les applications d'aubes de turbines aéronautiques, le $\text{WC-10Ni-0,2 \% Cr}_3\text{C}_2$ a une durée de vie de $> 6\,000 \text{ heures} \pm 500 \text{ heures}$, soit $20 \% \pm 5 \%$ de plus que $5\,000 \text{ heures} \pm 500 \text{ heures}$ sans ajout, et réduit le taux de défaillance causé par les fissures à chaud d'environ $30 \% \pm 5 \%$.

8.3.2.7 Extension et limites d'application des additifs Cr_3C_2 dans le carbure cémenté

Français Les ajouts de Cr_3C_2 rendent le carbure cémenté excellent dans les environnements oxydants à haute température (par exemple $1100^\circ\text{C} \pm 10^\circ\text{C}$) et corrosifs, adapté aux buses de turbines à gaz (durée de vie $> 10^4 \text{ heures} \pm 10^3 \text{ heures}$) et aux moules à haute température (cycles $> 10^5 \text{ fois} \pm 10^4 \text{ fois}$). Dans les atmosphères contenant du SO_2 , la couche de Cr_2O_3 reste protectrice (gain de poids $< 0,35 \text{ mg/cm}^2 \pm 0,05 \text{ mg/cm}^2$) , mais dans un acide fort avec un $\text{pH} < 1 \pm 0,1$, le taux de dissolution augmente de $15 \% \pm 3 \%$, et doit être optimisé en combinaison avec un revêtement TiN (épaisseur $5\text{-}10 \mu\text{m} \pm 0,1 \mu\text{m}$) . Le Cr_3C_2 est plus cher (environ 2 à 3 fois celui du WC) et la quantité ajoutée doit être contrôlée ($0,2 \% \pm 0,5 \% \pm 0,01 \%$) pour équilibrer les performances et l'économie.

8.3.2.8 Orientation de l'optimisation et perspectives d'avenir d'introduire des additifs Cr_3C_2 dans le carbure cémenté

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

Pour améliorer l'effet Cr_3C_2 , du TaC ($0,1 \% \pm 0,01 \%$) peut être ajouté pour améliorer la stabilité thermique de la couche Cr_2O_3 , et i_{corr} est réduit à $5 \times 10^{-7} \text{ A/cm}^2 \pm 10^{-8} \text{ A/cm}^2$. À des températures ultra-élevées ($> 1200^\circ\text{C} \pm 10^\circ\text{C}$), combiné à un revêtement Al_2O_3 (épaisseur $10\text{-}15 \mu\text{m} \pm 0,1 \mu\text{m}$), le gain de poids peut être contrôlé à $0,2 \text{ mg/cm}^2 \pm 0,05 \text{ mg/cm}^2$, dureté $> \text{HV } 1600 \pm 30$. À l'avenir, le développement d'additifs composites nano- Cr_3C_2 (taille des particules $< 0,1 \mu\text{m} \pm 0,01 \mu\text{m}$) ou Cr-Ni peut encore améliorer la résistance à l'oxydation et l'économie et s'étendre aux applications d'équipements énergétiques extrêmes.

Additifs Cr_3C_2 ($0,2 \% \text{-} 0,5 \% \pm 0,01 \%$) réduisent significativement le gain de masse ($< 0,3 \text{ mg/cm}^2$) en formant une couche de Cr_2O_3 (épaisseur $0,1\text{-}0,2 \mu\text{m} \pm 0,05 \mu\text{m}$). $\pm 0,05 \text{ mg/cm}^2$) et le courant de corrosion ($i_{\text{corr}} < 10^{-6} \text{ A/cm}^2 \pm 10^{-7} \text{ A/cm}^2$), la résistance à l'oxydation s'est améliorée de $40 \% \pm 5 \%$, tout en maintenant la dureté ($> \text{HV } 1500 \pm 30$) et la ténacité ($K_{\text{IC}} > 12 \text{ MPa} \cdot \text{m}^{1/2} \pm 0,5 \text{ MPa} \cdot \text{m}^{1/2}$). Optimiser le processus de préparation (optimisation de la composition Cr_3C_2 $0,2\%\text{-}0,5\% \pm 0,01\%$, broyage à billes 40 heures ± 1 heure, frittage $1450^\circ\text{C} \pm 10^\circ\text{C}$, post-traitement HIP, polissage de surface $R_a < 0,05 \mu\text{m} \pm 0,01 \mu\text{m}$) pour garantir des performances stables. Des facteurs tels que la quantité d'ajout, la granulométrie, la température de frittage, l'environnement et la rugosité de surface doivent être entièrement contrôlés. Il est adapté aux environnements à haute température et corrosifs. À l'avenir, son application pourra être encore élargie grâce aux ajouts et revêtements composites.

8.3.3 Protection de surface en alliage dur

8.3.3.1 Aperçu du principe de protection et de la technologie du revêtement de surface en carbure cémenté

La technologie de protection par revêtement de surface améliore considérablement la résistance à la corrosion et aux hautes températures du carbure cémenté, notamment en milieu chaud ($1\ 000^\circ\text{C} \pm 10^\circ\text{C}$) et corrosif (tel que les environnements acides ou le brouillard salin). Les revêtements recommandés incluent TiN et Al_2O_3 , d'une épaisseur de $5 \text{ à } 20 \mu\text{m} \pm 0,1 \mu\text{m}$, obtenus par dépôt physique en phase vapeur (PVD, $400^\circ\text{C} \pm 10^\circ\text{C}$) ou chimique en phase vapeur (CVD, $1\ 000^\circ\text{C} \pm 10^\circ\text{C}$). Revêtement TiN (dureté $> \text{HV } 2000 \pm 50$, densité $\sim 5,4 \text{ g/cm}^3 \pm 0,1 \text{ g/cm}^3$) avec une excellente résistance à l'usure et à l'oxydation, gain de masse $< 0,2 \text{ mg/cm}^2 \pm 0,05 \text{ mg/cm}^2$, le courant de corrosion (i_{corr}) est réduit à $< 8 \times 10^{-7} \text{ A/cm}^2 \pm 10^{-8} \text{ A/cm}^2$. Le revêtement Al_2O_3 (point de fusion $2072^\circ\text{C} \pm 10^\circ\text{C}$, conductivité thermique $\sim 30 \text{ W/m} \cdot \text{K} \pm 2 \text{ W/m} \cdot \text{K}$) isole l'oxygène et les milieux corrosifs en formant une couche d'oxyde dense (épaisseur $\sim 0,5 \mu\text{m} \pm 0,1 \mu\text{m}$), et le taux de perte de poids est maintenu à $< 0,04 \text{ mg/cm}^2 \pm 0,01 \text{ mg/cm}^2$, mieux que $0,07 \text{ mg/cm}^2$ des échantillons non revêtus $\pm 0,01 \text{ mg/cm}^2$. Ces revêtements fonctionnent en synergie avec des phases liantes à base de Ni ou des additifs Cr_3C_2 pour maintenir la dureté ($> \text{HV } 1800 \pm 30$) et la ténacité ($K_{\text{IC}} > 12 \text{ MPa} \cdot \text{m}^{1/2} \pm 0,5 \text{ MPa} \cdot \text{m}^{1/2}$), ce qui les rend largement utilisés dans les aubes de turbines aérospatiales, les équipements chimiques et les outils marins. De plus, la stabilité à haute température des revêtements (TiN jusqu'à $800^\circ\text{C} \pm 10^\circ\text{C}$, Al_2O_3 jusqu'à $1000^\circ\text{C} \pm 10^\circ\text{C}$) réduit la dégradation des performances causée par les cycles thermiques (ΔT $500^\circ\text{C} \pm 10^\circ\text{C}$).

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

8.3.3.2 Analyse du mécanisme de résistance à la corrosion et à l'oxydation du revêtement de surface en carbure cémenté

L'effet protecteur du revêtement de surface provient de sa barrière physique et de son inertie chimique. Dans un environnement oxydant à $1\,000\text{ }^{\circ}\text{C} \pm 10\text{ }^{\circ}\text{C}$, le revêtement Al_2O_3 forme une couche d'oxyde dense par réaction ($4\text{Al} + 3\text{O}_2 \rightarrow 2\text{Al}_2\text{O}_3$, $\Delta G < -1\,500\text{ kJ/mol} \pm 50\text{ kJ/mol}$), et son faible coefficient de diffusion de l'oxygène ($D_{\text{O}} \approx 10^{-15}\text{ cm}^2/\text{s} \pm 10^{-16}\text{ cm}^2/\text{s}$) contrôle le gain de masse à $< 0,2\text{ mg/cm}^2 \pm 0,05\text{ mg/cm}^2$, et la résistance à l'oxydation est améliorée d'environ $60\% \pm 5\%$. Le revêtement TiN réduit l'usure de surface et la propagation des microfissures (de $0,05\text{ mm} \pm 0,01\text{ mm}$ à $< 0,02\text{ mm} \pm 0,01\text{ mm}$) grâce à une dureté élevée ($> \text{HV } 2000 \pm 50$) et un faible coefficient de frottement ($\sim 0,4 \pm 0,05$). Dans les milieux acides (tels que $0,1\text{ M H}_2\text{SO}_4$, $\text{pH } 1 \pm 0,1$) ou le brouillard salin ($\text{NaCl } 5\% \pm 0,1\%$), le revêtement isole Cl^- et H^+ , i_{corr} est réduit à $8 \times 10^{-7}\text{ A/cm}^2 \pm 10^{-8}\text{ A/cm}^2$ et le taux de perte de poids est réduit à $0,04\text{ mg/cm}^2 \pm 0,01\text{ mg/cm}^2$, contre $0,07\text{ mg/cm}^2$ pour le revêtement non revêtu $\pm 0,01\text{ mg/cm}^2$, soit une réduction d'environ $43\% \pm 5\%$. Le coefficient de dilatation thermique du revêtement correspond à celui du substrat ($\text{TiN } 9 \times 10^{-6}\text{ K}^{-1}$, $\text{Al}_2\text{O}_3\text{ } 8 \times 10^{-6}\text{ K}^{-1}$, $\text{WC } 5,2 \times 10^{-6}\text{ K}^{-1}$), réduisant ainsi la contrainte thermique ($< 300\text{ MPa} \pm 50\text{ MPa}$) et améliorant la résistance à la fatigue thermique.

8.3.3.3 Analyse microscopique et vérification du revêtement de surface en carbure cémenté

au microscope électronique à balayage (MEB, résolution $< 0,1\text{ }\mu\text{m} \pm 0,01\text{ }\mu\text{m}$) ont montré que les revêtements TiN et Al_2O_3 avaient des surfaces lisses et une épaisseur uniforme ($5\text{-}20\text{ }\mu\text{m} \pm 0,1\text{ }\mu\text{m}$), sans pelage ni fissures évidents, tandis que des taches d'oxydation (diamètre $\sim 0,4\text{ }\mu\text{m} \pm 0,01\text{ }\mu\text{m}$) apparaissaient à la surface de l'échantillon non revêtu. Français L'analyse par diffraction des rayons X (DRX) a confirmé la structure cristalline cubique de TiN ($a = 4,24\text{ }\text{\AA} \pm 0,01\text{ }\text{\AA}$, $2\theta \approx 36,7^{\circ}$, $42,6^{\circ}$) et la structure hexagonale de Al_2O_3 ($a = 4,76\text{ }\text{\AA} \pm 0,01\text{ }\text{\AA}$, $c = 12,99\text{ }\text{\AA} \pm 0,01\text{ }\text{\AA}$, $2\theta \approx 35,1^{\circ}$, $43,3^{\circ}$), et l'intensité du pic indique une cristallinité élevée. La spectroscopie dispersive en énergie (EDS) montre que la teneur en Ti ou Al dans le revêtement est $> 95\% \pm 1\%$, et qu'il est bien intégré au WC/Ni à l'interface (épaisseur de la couche de diffusion $\sim 0,1\text{ }\mu\text{m} \pm 0,05\text{ }\mu\text{m}$). La spectroscopie photoélectronique à rayons X (XPS) détecte le pic Ti 2p (environ $455\text{ eV} \pm 0,1\text{ eV}$) ou le pic Al 2p ($74\text{ eV} \pm 0,1\text{ eV}$), qui correspond au pic O 1s ($530\text{ eV} \pm 0,1\text{ eV}$), vérifiant la formation de la couche d'oxyde.

8.3.3.4 Analyse des facteurs affectant le revêtement de surface en carbure cémenté

L'effet de la protection du revêtement de surface est affecté par de nombreux facteurs et doit être contrôlé avec précision :

(1) Épaisseur du revêtement

l'épaisseur est de $5\text{-}10\text{ }\mu\text{m} \pm 0,1\text{ }\mu\text{m}$, $i_{\text{corr}} < 8 \times 10^{-7}\text{ A/cm}^2 \pm 10^{-8}\text{ A/cm}^2$ et perte de poids $< 0,04\text{ mg/cm}^2 \pm 0,01\text{ mg/cm}^2$. Si l'épaisseur est $> 20\text{ }\mu\text{m} \pm 0,1\text{ }\mu\text{m}$, la contrainte interne augmente ($>$

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

500 MPa $\pm$ 50 MPa), le risque d'écaillage augmente de 10 % $\pm$ 2 %, et i_{corr} augmente à 9×10^{-7} A/cm² $\pm$ 10^{-8} A/cm².

(2) Type de revêtement

TiN fonctionnent bien à 800°C $\pm$ 10°C (gain de poids < 0,2 mg/cm² $\pm$ 0,05 mg/cm²), mais l'oxydation augmente à > 900°C $\pm$ 10°C (gain de poids > 0,3 mg/cm² $\pm$ 0,05 mg/cm²). Les revêtements Al₂O₃ sont stables à 1000°C $\pm$ 10°C (gain de poids < 0,15 mg/cm² $\pm$ 0,05 mg/cm²), mais la résistance à l'usure est légèrement inférieure à celle du TiN (la dureté diminue de 5% $\pm$ 1%).

(3) Température de dépôt

PVD 400°C $\pm$ 10°C Assure l'adhérence du revêtement TiN (> 50 N/mm² $\pm$ 5 N/mm²), si > 500°C $\pm$ 10°C, fissuration sous contrainte thermique (largeur ~0,1 μ m $\pm$ 0,01 μ m). CVD 1000°C $\pm$ 10°C convient à Al₂O₃, mais l'adoucissement de la matrice (réduction de la dureté de 10% $\pm$ 2%) doit être optimisé.

(4) Environnement

Français Lorsque le pH < 2 $\pm$ 0,1, le taux de dissolution du revêtement TiN augmente de 15 % $\pm$ 3 % (i_{corr} à 9×10^{-7} A/cm² $\pm$ 10^{-8} A/cm²) et Al₂O₃ est stable (i_{corr} < 8×10^{-7} A/cm² $\pm$ 10^{-8} A/cm²). Dans un brouillard salin NaCl > 5 % $\pm$ 0,1 %, la zone de piqûres augmente de 10 % $\pm$ 2 % (de 0,01 mm² $\pm$ 0,001 mm² à 0,011 mm² $\pm$ 0,001 mm²).

(5) Rugosité de surface

Adhérence élevée du revêtement (> 60 N/mm²) avec Ra < 0,05 μ m $\pm$ 0,01 μ m $\pm$ 5 N/mm², i_{corr} est faible. Si Ra > 0,1 μ m $\pm$ 0,01 μ m, les défauts augmentent, i_{corr} augmente de 7 % $\pm$ 2 % (à $8,6 \times 10^{-7}$ A/cm² $\pm$ 10^{-8} A/cm²).

Par exemple, un échantillon de WC-10Ni recouvert d'Al₂O₃ (20 Le revêtement TiN optimisé (10 μ m $\pm$ 0,1 μ m, PVD 400 °C $\pm$ 10 °C, Ra < 0,05 μ m $\pm$ 0,01 μ m) présente une contrainte interne importante, un taux de pelage de 15 % $\pm$ 2 % et une perte de poids de 0,06 mg/cm² $\pm$ 0,01 mg/cm². La perte de poids du revêtement TiN optimisé (10 μ m $\pm$ 0,1 μ m, PVD 400 °C $\pm$ 10 °C, Ra < 0,05 μ m $\pm$ 0,01 μ m) n'est que de 0,03 mg/cm² $\pm$ 0,01 mg/cm². i_{corr} < 8×10^{-7} A/cm² $\pm$ 10^{-8} A/cm², résistance à la corrosion améliorée d'environ 57 % $\pm$ 5 %.

8.3.3.6 Optimisation du processus de préparation pour la protection des revêtements de surface en carbure cémenté

Pour obtenir une perte de poids < 0,04 mg/cm² $\pm$ 0,01 mg/cm² et un coefficient de correction i < 8×10^{-7} A/cm² $\pm$ 10^{-8} A/cm², le procédé de revêtement de surface doit être contrôlé avec précision. Les stratégies recommandées sont les suivantes :

(1) Prétraitement du substrat

La rugosité de surface (Ra) du WC-10Ni a été contrôlée à 0,05 μ m $\pm$ 0,01 μ m par polissage, et un nettoyage par ultrasons (40 kHz $\pm$ 1 kHz, 10 min $\pm$ 1 min) a été utilisé pour éliminer les contaminants

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

(< 0,1 % ± 0,02 %) et améliorer l'adhérence du revêtement (> 60 N/mm²) . ± 5 N/ mm²) .

(2) Sélection et épaisseur du revêtement

Choisissez TiN (épaisseur 5-10 µm ± 0,1 µm) ou Al₂O₃ (épaisseur 10-15 µm ± 0,1 µm). TiN utilise PVD (400 °C ± 10 °C, tension de polarisation -100 V ± 10 V, vitesse de dépôt 0,5 µm / h ± 0,1 µm / h), Al₂O₃ utilise CVD (1000 °C ± 10 °C, pression 10 kPa ± 1 kPa, vitesse de dépôt 0,3 µm / h ± 0,1 µm / h) pour éviter les contraintes internes causées par une épaisseur excessive (> 20 µm ± 0,1 µm) .

(3) Optimisation du processus de dépôt

En PVD, le rapport de flux Ar /N₂ (1:1 ± 0,1) est contrôlé pour garantir la pureté de la phase TiN (> 98 % ± 1 %). En CVD, de l'H₂ (5 % ± 0,5 %) est ajouté pour améliorer la densité d' Al₂O₃ (porosité < 0,05 % ± 0,01 %) et réduire la diffusion d'oxygène.

(4) Post-traitement

Le recuit à basse température (500°C ± 10°C, 2 heures ± 0,1 heure) est utilisé pour libérer les contraintes résiduelles (< 200 MPa ± 20 MPa) et améliorer la liaison entre le revêtement et le substrat (résistance au cisaillement de l'interface > 50 N/mm²) . ± 5 N/ mm²) .

(5) Revêtement multicouche

d' une structure à double couche de TiN (5 µm ± 0,1 µm) + Al₂O₃ (10 µm ± 0,1 µm), TiN offre une résistance à l'usure, Al₂O₃ améliore la résistance à l'oxydation, i_{corr} tombe à 7 × 10⁻⁷ A / cm² ± 10⁻⁸ A / cm² et le taux de perte de poids < 0,03 mg/ cm² ± 0,01 mg/ cm².

(6) Finition de surface

d' ions (énergie 500 eV ± 50 eV) a été utilisé pour optimiser Ra à 0,03 µm ± 0,01 µm, réduire les microfissures et réduire la zone de piqûres de 10 % ± 2 % (de 0,011 mm² ± 0,001 mm² à 0,0099 mm² ± 0,001 mm²) .

Ces procédés assurent un revêtement homogène avec une adhérence de > 60 N/mm² ± 5 N/mm², en maintenant la dureté (> HV 1800 ± 30) et la ténacité (K_{1c} > 12 MPa·m^{1/2} ± 0,5 MPa·m^{1/2}) .

8.3.3.7 Cas d'ingénierie et comparaison des performances des revêtements de surface en carbure cémenté

En prenant comme exemples le WC-10Ni-TiN (10 µm ± 0,1 µm) et le WC-10Ni non revêtu, après oxydation à 1000°C ± 10°C pendant 100 heures ± 10 heures, l' échantillon de revêtement TiN a gagné 0,15 mg/cm² ± 0,05 mg/cm², i_{corr} < 8 × 10⁻⁷ A/cm² ± 10⁻⁸ A/cm², contre 0,5 mg/cm² pour le non revêtu ± 0,05 mg/cm² et 1,1 × 10⁻⁶ A/cm² ± 10⁻⁷ A/cm², et la résistance à l'oxydation est améliorée de 70% ± 5%. Français Dans l'essai au brouillard salin (NaCl 5 % ± 0,1 %, 2 000 h ± 100 h), le taux de perte de poids est réduit à 0,03 mg/cm² ± 0,01 mg/cm², profondeur de piqûre < 1,5 µm ± 0,5 µm, mieux que 0,07 mg/cm² pour non revêtu ± 0,01 mg/cm² et 3,5 µm ± 0,5 µm. Dans les aubes de turbine d'aviation, la durée de vie des échantillons revêtus de TiN est > 7 000 heures ±

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

500 heures, soit $40 \% \pm 5 \%$ de plus que les 5 000 heures ± 500 heures non revêtues, et le taux de défaillance par fissure thermique est réduit d'environ $35 \% \pm 5 \%$.

8.3.3.8 Extension et limites d'application des revêtements de surface en carbure cémenté

Français Le revêtement de surface permet au carbure cémenté de bien fonctionner dans l'oxydation à haute température (comme $1100^{\circ}\text{C} \pm 10^{\circ}\text{C}$) et les environnements corrosifs, adapté aux buses de turbine à gaz (durée de vie $> 10^4$ heures $\pm 10^3$ heures) et aux trépan de forage en haute mer (résistance à la pression $> 30 \text{ MPa} \pm 2 \text{ MPa}$). Dans l'atmosphère, les revêtements Al_2O_3 restent protecteurs (gain de poids $< 0,2 \text{ mg/cm}^2 \pm 0,05 \text{ mg/cm}^2$), mais le taux de dissolution du TiN dans un acide fort avec un $\text{pH} < 1 \pm 0,1$ augmente de $20 \% \pm 3 \%$, et doit être optimisé en combinaison avec Al_2O_3 . Le coût du processus de revêtement est relativement élevé (environ 2 à 3 fois celui du substrat) et l'économie doit être contrôlée grâce à une conception en couche mince (5 à $10 \mu\text{m} \pm 0,1 \mu\text{m}$).

8.3.3.9 Orientation d'optimisation et perspectives d'avenir du revêtement de surface en carbure cémenté

Pour améliorer l'effet de revêtement, un revêtement à gradient TiN / Al_2O_3 (épaisseur $15 \mu\text{m} \pm 0,1 \mu\text{m}$) peut être développé, et i_{corr} est réduit à $6 \times 10^{-7} \text{ A/cm}^2 \pm 10^{-8} \text{ A/cm}^2$. À des températures ultra-élevées ($> 1200^{\circ}\text{C} \pm 10^{\circ}\text{C}$), du ZrO_2 ($5\% \pm 0,5\%$) est ajouté pour améliorer la stabilité thermique, avec un gain de poids de $< 0,15 \text{ mg/cm}^2 \pm 0,05 \text{ mg/cm}^2$, dureté $> \text{HV } 1900 \pm 30$. À l'avenir, la projection plasma (température $800^{\circ}\text{C} \pm 10^{\circ}\text{C}$) ou le nano-revêtement (taille des particules $< 0,1 \mu\text{m} \pm 0,01 \mu\text{m}$) pourront être utilisés pour améliorer l'adhérence et la durabilité et s'étendre aux applications extrêmes des équipements aéronautiques et énergétiques.

Les revêtements de surface (par exemple TiN $5\text{-}10 \mu\text{m} \pm 0,1 \mu\text{m}$, Al_2O_3 $10\text{-}15 \mu\text{m} \pm 0,1 \mu\text{m}$) réduisent considérablement la perte de poids ($< 0,04 \text{ mg/cm}^2$) en formant une couche protectrice (épaisseur $\sim 0,5 \mu\text{m} \pm 0,1 \mu\text{m}$) $\pm 0,01 \text{ mg/cm}^2$ et le courant de corrosion ($i_{\text{corr}} < 8 \times 10^{-7} \text{ A/cm}^2 \pm 10^{-8} \text{ A/cm}^2$), la résistance à l'oxydation augmentée de $60 \% \pm 5 \%$, la dureté ($> \text{HV } 1800 \pm 30$) et la ténacité ($K_{\text{Ic}} > 12 \text{ MPa}\cdot\text{m}^{1/2} \pm 0,5 \text{ MPa}\cdot\text{m}^{1/2}$). Optimiser le processus de préparation (prétraitement du substrat $R_a < 0,05 \mu\text{m} \pm 0,01 \mu\text{m}$, dépôt PVD/CVD, recuit à basse température, conception multicouche) pour garantir des performances stables. L'épaisseur du revêtement, le type, la température de dépôt, l'environnement et les facteurs de rugosité de surface doivent être entièrement contrôlés. Il est adapté aux environnements à haute température et corrosifs. À l'avenir, le revêtement à gradient et la nanotechnologie pourront être utilisés pour étendre davantage l'application.

8.3.4 Optimisation des paramètres de procédé pour la résistance à la corrosion et la résistance aux hautes températures du carbure cémenté

8.3.4.1 Aperçu des principes et des technologies d'optimisation des paramètres de processus

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

pour la résistance à la corrosion et la résistance aux hautes températures du carbure cimenté

L'optimisation des paramètres de procédé est essentielle pour améliorer la résistance à la corrosion et aux températures élevées du carbure cimenté. Un contrôle précis de la température, de la pression, du temps et d'autres paramètres du procédé de préparation permet d'optimiser l'effet synergétique de la phase liante à base de nickel, des additifs Cr_3C_2 et du revêtement de surface. Les paramètres d'optimisation recommandés incluent une température de frittage de $1450\text{ }^\circ\text{C} \pm 10\text{ }^\circ\text{C}$, une pression $< 10^{-3}\text{ Pa} \pm 10^{-4}\text{ Pa}$, une durée de broyage à boulets de 40 heures ± 1 heure et une température de compression isostatique à chaud (CIC) de $1200\text{ }^\circ\text{C} \pm 10\text{ }^\circ\text{C}$. Une fois ces paramètres optimisés, le taux de perte de poids du carbure cimenté est réduit à $< 0,04\text{ mg/cm}^2 \pm 0,01\text{ mg/cm}^2$, le courant de corrosion (i_{corr}) réduit à $< 8 \times 10^{-7}\text{ A/cm}^2 \pm 10^{-8}\text{ A/cm}^2$, la dureté maintenue $> \text{HV } 1800 \pm 30$, la ténacité $> 12\text{ MPa}\cdot\text{m}^{1/2} \pm 0,5\text{ MPa}\cdot\text{m}^{1/2}$. Le procédé optimisé réduit les micro-défauts (porosité $< 0,1\% \pm 0,02\%$) et la ségrégation de phase ($< 0,1\% \pm 0,02\%$), et améliore la résistance aux joints de grains ($> 200\text{ MPa} \pm 20\text{ MPa}$), ce qui en fait un matériau excellent à haute température ($1000\text{ }^\circ\text{C} \pm 10\text{ }^\circ\text{C}$) et en environnement corrosif ($\text{NaCl } 5\% \pm 0,1\%$). Il convient également au forage offshore, aux turbines d'aviation et aux équipements chimiques. De plus, le procédé optimisé réduit la concentration de contraintes ($< 300\text{ MPa} \pm 50\text{ MPa}$) due aux cycles thermiques ($\Delta T\text{ } 500\text{ }^\circ\text{C} \pm 10\text{ }^\circ\text{C}$), prolongeant ainsi la durée de vie.

8.3.4.2 Analyse de la résistance à la corrosion et du mécanisme de performance de l'optimisation des paramètres du procédé de fabrication du carbure cimenté

L'optimisation des paramètres de procédé repose sur l'uniformité de la microstructure et de la distribution des phases. Lors d'un frittage à $1450\text{ }^\circ\text{C} \pm 10\text{ }^\circ\text{C}$, la phase liante à base de Ni forme une solution solide uniforme avec WC (écart de distribution du Ni $< 0,1\% \pm 0,02\%$), l'épaisseur de la couche de NiO est stabilisée à $10\text{ nm} \pm 1\text{ nm}$ et i_{corr} est réduit à $< 10^{-6}\text{ A/cm}^2 \pm 10^{-7}\text{ A/cm}^2$. Le broyage à boulets pendant 40 heures ± 1 heure affine les grains ($0,51\text{ }\mu\text{m} \pm 0,01\text{ }\mu\text{m}$), augmente la densité des joints de grains à $> 10^4\text{ mm}^2/\text{cm}^3 \pm 10^3\text{ mm}^2/\text{cm}^3$, réduit la pénétration des milieux corrosifs et le taux de perte de poids est $< 0,04\text{ mg/cm}^2 \pm 0,01\text{ mg/cm}^2$. Le HIP $1200\text{ }^\circ\text{C} \pm 10\text{ }^\circ\text{C}$ élimine la porosité résiduelle ($< 0,05\% \pm 0,01\%$), la densité atteint $99,7\% \pm 0,1\%$ et améliore la résistance à l'oxydation (gain de masse $< 0,25\text{ mg/cm}^2 \pm 0,05\text{ mg/cm}^2$). Lors de l'oxydation à haute température ($1000\text{ }^\circ\text{C} \pm 10\text{ }^\circ\text{C}$), les paramètres optimisés ont réduit la volatilisation de Cr_3C_2 (perte $< 0,05\% \pm 0,01\%$), l'épaisseur de la couche de Cr_2O_3 est restée à $0,1\text{--}0,2\text{ }\mu\text{m} \pm 0,05\text{ }\mu\text{m}$ et la résistance à l'oxydation a été améliorée d'environ $45\% \pm 5\%$. La correspondance des coefficients de dilatation thermique ($\text{WC } 5,2 \times 10^{-6}\text{ K}^{-1}$, $\text{Ni } 13 \times 10^{-6}\text{ K}^{-1}$) a réduit les fissures de fatigue thermique ($< 0,03\text{ mm} \pm 0,01\text{ mm}$) et a amélioré la stabilité à long terme.

8.3.4.3 Analyse microscopique et vérification de l'optimisation des paramètres de processus pour la résistance à la corrosion et la résistance à haute température du carbure cimenté

par microscopie électronique à balayage (MEB, résolution $< 0,1\text{ }\mu\text{m} \pm 0,01\text{ }\mu\text{m}$) ont montré que les échantillons de processus optimisés avaient des grains uniformes ($0,51\text{ }\mu\text{m} \pm 0,01\text{ }\mu\text{m}$) et une porosité $< 0,1\% \pm 0,02\%$, tandis que les échantillons non optimisés (frittés à $1500\text{ }^\circ\text{C} \pm 10\text{ }^\circ\text{C}$)

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

avaient des zones de ségrégation (diamètre $\sim 0,5 \mu\text{m} \pm 0,01 \mu\text{m}$). L'analyse par diffraction des rayons X (DRX) a confirmé que les intensités maximales de la phase WC ($2\theta \approx 35,6^\circ, 48,3^\circ$) et de la phase Ni ($2\theta \approx 44,5^\circ$) étaient uniformes, indiquant une distribution de phase optimisée. Français La spectroscopie dispersive en énergie (EDS) a montré que les teneurs en Ni et Cr aux joints de grains étaient respectivement de $8\%-10\% \pm 0,5\%$ et de $0,5\%-1\% \pm 0,1\%$, sans ségrégation évidente. La spectroscopie de photoélectrons X (XPS) a détecté le pic Ni 2p ($854 \text{ eV} \pm 0,1 \text{ eV}$) et le pic Cr 2p ($576,5 \text{ eV} \pm 0,1 \text{ eV}$), qui correspondaient au pic O 1s ($530 \text{ eV} \pm 0,1 \text{ eV}$), vérifiant la formation de couches NiO et Cr₂O₃.

8.3.4.4 Analyse des facteurs affectant l'optimisation des paramètres de processus de résistance à la corrosion et de résistance aux hautes températures du carbure cémenté

L'effet de l'optimisation des paramètres du processus est affecté par de nombreux facteurs et doit être contrôlé avec précision :

(1) Température de frittage

À $1450^\circ\text{C} \pm 10^\circ\text{C}$, l'écart de distribution du Ni est $< 0,1\% \pm 0,02\%$, $i_{\text{corr}} < 8 \times 10^{-7} \text{ A/cm}^2 \pm 10^{-8} \text{ A/cm}^2$. Si $> 1500^\circ\text{C} \pm 10^\circ\text{C}$, la ségrégation du Ni est $> 0,5\% \pm 0,1\%$, i_{corr} augmente de $15\% \pm 3\%$ (à $1,15 \times 10^{-6} \text{ A/cm}^2 \pm 10^{-7} \text{ A/cm}^2$), et le taux de perte de poids augmente à $0,07 \text{ mg/cm}^2 \pm 0,01 \text{ mg/cm}^2$.

(2) Temps de broyage à boulets

À 40 heures ± 1 heure, la granulométrie est de $0,51 \mu\text{m} \pm 0,01 \mu\text{m}$ et le taux de perte de poids est $< 0,04 \text{ mg/cm}^2 \pm 0,01 \text{ mg/cm}^2$. Si < 30 heures ± 1 heure, les grains grossiront ($> 0,7 \mu\text{m} \pm 0,01 \mu\text{m}$) et le taux de perte de poids augmentera de $10\% \pm 2\%$ (jusqu'à $0,044 \text{ mg/cm}^2 \pm 0,01 \text{ mg/cm}^2$).

(3) Pression

À un degré de vide $< 10^{-3} \text{ Pa} \pm 10^{-4} \text{ Pa}$, une teneur en oxygène $< 0,01\% \pm 0,001\%$, un gain de masse $< 0,25 \text{ mg/cm}^2 \pm 0,05 \text{ mg/cm}^2$. Si la pression est $> 10^{-2} \text{ Pa} \pm 10^{-3} \text{ Pa}$, le gain de masse par oxydation est de $20\% \pm 3\%$ (à $0,3 \text{ mg/cm}^2 \pm 0,05 \text{ mg/cm}^2$).

(4) Température HIP

À $1200^\circ\text{C} \pm 10^\circ\text{C}$, la densité est de $99,7\% \pm 0,1\%$ et la profondeur de piqure est $< 2 \mu\text{m} \pm 0,5 \mu\text{m}$. À $> 1300^\circ\text{C} \pm 10^\circ\text{C}$, la matrice se ramollit (la dureté diminue de $5\% \pm 1\%$) et i_{corr} augmente à $9 \times 10^{-7} \text{ A/cm}^2 \pm 10^{-8} \text{ A/cm}^2$.

(5) Humidité ambiante

Lorsque l'humidité $> 50\% \pm 5\%$, l'oxydation de surface est accélérée et i_{corr} augmente de $10\% \pm 2\%$ (à $8,8 \times 10^{-7} \text{ A/cm}^2 \pm 10^{-8} \text{ A/cm}^2$), ce qui doit être combiné avec l'optimisation du revêtement.

Par exemple, un échantillon de WC-10Ni a été fritté à $1500^\circ\text{C} \pm 10^\circ\text{C}$ et $10^{-2} \text{ Pa} \pm 10^{-3} \text{ Pa}$, avec

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

une perte de poids de $0,08 \text{ mg/cm}^2 \pm 0,01 \text{ mg/cm}^2$, i_{corr} atteint $1,2 \times 10^{-6} \text{ A/cm}^2 \pm 10^{-7} \text{ A/cm}^2$. Le taux de perte de masse du procédé optimisé ($1450^\circ\text{C} \pm 10^\circ\text{C}$, $< 10^{-3} \text{ Pa} \pm 10^{-4} \text{ Pa}$, HIP $1200^\circ\text{C} \pm 10^\circ\text{C}$) est réduit à $0,03 \text{ mg/cm}^2 \pm 0,01 \text{ mg/cm}^2$. $i_{\text{corr}} < 8 \times 10^{-7} \text{ A/cm}^2 \pm 10^{-8} \text{ A/cm}^2$, résistance à la corrosion améliorée d'environ $62\% \pm 5\%$.

8.3.4.5 Stratégie d'optimisation des paramètres de procédé pour la résistance à la corrosion et la résistance à haute température du carbure cémenté

Pour obtenir une perte de poids $< 0,04 \text{ mg/cm}^2 \pm 0,01 \text{ mg/cm}^2$ et un coefficient de corrélation $i_{\text{corr}} < 8 \times 10^{-7} \text{ A/cm}^2 \pm 10^{-8} \text{ A/cm}^2$, les paramètres du procédé doivent être contrôlés avec précision. Les stratégies recommandées sont les suivantes :

(1) Rapport de poudre et broyage à boulets

de WC (taille des particules $0,51 \mu\text{m} \pm 0,01 \mu\text{m}$), Ni ($8\% - 10\% \pm 1\%$) et Cr_3C_2 ($0,2\% - 0,5\% \pm 0,01\%$) ont été sélectionnées et broyées à boulets par voie humide (milieu éthanol anhydre, 40 heures ± 1 heure, rapport bille/matériau $10:1 \pm 0,5$). L'écart de distribution granulométrique était $< 0,02 \mu\text{m} \pm 0,01 \mu\text{m}$ et l'agglomération était réduite ($< 0,1\% \pm 0,02\%$).

(2) Frittage sous vide

Température $1450^\circ\text{C} \pm 10^\circ\text{C}$, pression $< 10^{-3} \text{ Pa} \pm 10^{-4} \text{ Pa}$, temps de maintien 1 heure $\pm 0,1$ heure, masse volumique $99,5\% \pm 0,1\%$, porosité $< 0,1\% \pm 0,02\%$. Éviter la ségrégation induite par $> 1500^\circ\text{C} \pm 10^\circ\text{C}$.

(3) Pressage isostatique à chaud (HIP)

À une température de $1200^\circ\text{C} \pm 10^\circ\text{C}$, une pression de $200 \text{ MPa} \pm 10 \text{ MPa}$ et un temps de 1 heure $\pm 0,1$ heure, la densité a augmenté à $99,7\% \pm 0,1\%$, la porosité a été éliminée ($< 0,05\% \pm 0,01\%$), et la profondeur des piqûres a été réduite à $< 1,5 \mu\text{m} \pm 0,5 \mu\text{m}$.

Traitement de recuit : Le recuit à basse température ($500^\circ\text{C} \pm 10^\circ\text{C}$, 2 heures $\pm 0,1$ heure) libère les contraintes ($< 200 \text{ MPa} \pm 20 \text{ MPa}$) et améliore la résistance aux joints de grains ($> 200 \text{ MPa} \pm 20 \text{ MPa}$).

(4) Contrôle environnemental

Maintenir une humidité $< 10\% \pm 1\%$ et une teneur en oxygène $< 0,01\% \pm 0,001\%$ pendant le frittage et le HIP pour réduire l'oxydation de surface (gain de poids $< 0,1 \text{ mg/cm}^2 \pm 0,05 \text{ mg/cm}^2$).

(5) Surveillance du processus

La surveillance de la température en ligne (précision $\pm 5^\circ\text{C}$) et les capteurs de pression (précision $\pm 10^{-5} \text{ Pa}$) sont utilisés pour garantir un écart de paramètre $< 1\%$ et optimiser l'uniformité de la distribution de phase.

Ces paramètres assurent une microstructure dense avec une résistance aux joints de grains $> 200 \text{ MPa} \pm 20 \text{ MPa}$, maintenant la dureté ($> \text{HV } 1800 \pm 30$) et la ténacité ($K_{\text{IC}} > 12 \text{ MPa} \cdot \text{m}^{1/2} \pm 0,5$).

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

MPa·m^{1/2}).

8.3.4.6 Cas d'ingénierie et comparaison des performances de l'optimisation des paramètres de processus pour la résistance à la corrosion du carbure cimenté et la résistance aux hautes températures

En prenant comme exemples le procédé optimisé WC-10Ni-0,2%Cr₃C₂ - TiN (10 μm ± 0,1 μm) et le WC-10Ni non optimisé, après oxydation à 1000°C ± 10°C pendant 100 heures ± 10 heures , l'échantillon optimisé a gagné 0,15 mg/ cm² ± 0,05 mg/ cm² , i_{corr} < 7×10⁻⁷ A/cm² ± 10⁻⁸ A/ cm² , par rapport au non optimisé 0,5 mg/ cm² ± 0,05 mg/cm² et 1,1×10⁻⁶ A/cm² ± 10⁻⁷ A/cm² , et la résistance à l'oxydation est améliorée de Français 70 % ± 5 %. Dans l'essai au brouillard salin (NaCl 5 % ± 0,1 %, 2 000 h ± 100 h), le taux de perte de poids est réduit à 0,02 mg/cm² ± 0,01 mg/cm² , profondeur de piqure < 1 μm ± 0,5 μm , mieux que 0,07 mg/cm² ± 0,01 mg/cm² et 3,5 μm ± 0,5 μm non optimisés . Dans les aubes de turbine d'aviation, la durée de vie des échantillons optimisés est > 8 000 heures ± 500 heures, ce qui est 60 % ± 5 % plus longue que les 5 000 heures ± 500 heures non optimisées, et le taux de défaillance par fissure thermique est réduit d'environ 40 % ± 5 %.

8.3.4.7 Extension de l'application et limites de l'optimisation des paramètres de processus pour la résistance à la corrosion et la résistance aux hautes températures du carbure cimenté

Français Le procédé optimisé permet au carbure cimenté de bien fonctionner dans des environnements à très haute température (> 1100 °C ± 10 °C) et corrosifs, adapté aux buses de turbine à gaz (durée de vie > 10⁴ heures ± 10³ heures) et aux trépan de forage en haute mer (résistance à la pression > 30 MPa ± 2 MPa). Dans une atmosphère contenant du SO₂ , le gain de poids de l'échantillon optimisé est < 0,2 mg/cm² ± 0,05 mg/cm² , mais un acide fort de pH < 1 ± 0,1 doit être combiné avec un revêtement Al₂O₃ pour l'optimisation. Le coût de l'équipement de procédé est relativement élevé (environ 1,5 à 2 fois celui des procédés traditionnels), et le coût doit être réduit par la production de masse et la standardisation des paramètres.

8.3.4.8 Optimisation des paramètres de procédé pour la résistance à la corrosion et la résistance à haute température du carbure cimenté Orientation de l'optimisation et perspectives d'avenir

Français Pour améliorer encore l'effet, le frittage dynamique (gradient de température 50°C/cm ± 5°C/cm) peut être introduit pour réduire i_{corr} à 5×10⁻⁷ A/cm² ± 10⁻⁸ A/cm² . À des températures ultra-élevées (> 1200°C ± 10°C), la pression HIP est optimisée à 300 MPa ± 10 MPa, et le gain de poids est < 0,1 mg/cm² . ± 0,05 mg/cm² , dureté > HV 1900 ± 30. À l'avenir, l'utilisation de systèmes de surveillance intelligents et de poudres nanométriques (taille des particules < 0,1 μm ± 0,01 μm) peut améliorer la précision et l'efficacité et s'étendre aux applications extrêmes de l'énergie et de l'aviation.

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

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

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

L'optimisation des paramètres du procédé (frittage $1450^{\circ}\text{C} \pm 10^{\circ}\text{C}$, $< 10^{-3} \text{ Pa} \pm 10^{-4} \text{ Pa}$, broyage à billes $40 \text{ h} \pm 1 \text{ h}$, HIP $1200^{\circ}\text{C} \pm 10^{\circ}\text{C}$) a permis de réduire significativement la perte de poids ($< 0,04 \text{ mg/cm}^2$) en affinant la granulométrie ($0,51 \mu\text{m} \pm 0,01 \mu\text{m}$) et en éliminant les défauts (porosité $< 0,1\% \pm 0,02\%$). Français $\pm 0,01 \text{ mg/cm}^2$) et le courant de corrosion ($i_{\text{corr}} < 8 \times 10^{-7} \text{ A/cm}^2 \pm 10^{-8} \text{ A/cm}^2$), la résistance à l'oxydation augmentée de $45\% \pm 5\%$, la dureté ($> \text{HV } 1800 \pm 30$) et la ténacité ($K_{\text{Ic}} > 12 \text{ MPa} \cdot \text{m}^{1/2} \pm 0,5 \text{ MPa} \cdot \text{m}^{1/2}$). Des facteurs tels que la température de frittage, le temps de broyage à boulets, la pression, la température HIP et l'humidité ambiante doivent être régulés de manière exhaustive. Il convient aux environnements à haute température et corrosifs. À l'avenir, les processus dynamiques et la nanotechnologie pourront être utilisés pour étendre encore les applications.

8.3.5 . Contrôle de la microstructure du carbure cimenté

8.3.5.1 Aperçu des principes et des technologies de contrôle de la microstructure du carbure cimenté

Le contrôle de la microstructure est essentiel pour améliorer la résistance à la corrosion et aux hautes températures du carbure cimenté. Un contrôle précis de la granulométrie, de la distribution des phases et de la densité des défauts optimise l'effet synergique de la phase de liaison à base de nickel, des additifs Cr_3C_2 et du revêtement de surface. Les objectifs de contrôle recommandés sont une granulométrie de $0,51 \mu\text{m} \pm 0,01 \mu\text{m}$, un écart de distribution du nickel $< 0,1\% \pm 0,02\%$ et une porosité $< 0,1\% \pm 0,02\%$. Après contrôle, le taux de perte de poids du carbure cimenté est réduit à $< 0,03 \text{ mg/cm}^2 \pm 0,01 \text{ mg/cm}^2$, le courant de corrosion (i_{corr}) réduit à $< 7 \times 10^{-7} \text{ A/cm}^2 \pm 10^{-8} \text{ A/cm}^2$, la dureté maintenue $> \text{HV } 1800 \pm 30$, la ténacité $> 12 \text{ MPa} \cdot \text{m}^{1/2} \pm 0,5 \text{ MPa} \cdot \text{m}^{1/2}$. L'optimisation de la microstructure réduit les chemins de corrosion intergranulaire et les fissures de fatigue thermique ($< 0,02 \text{ mm} \pm 0,01 \text{ mm}$) et améliore la résistance intergranulaire ($> 200 \text{ MPa} \pm 20 \text{ MPa}$), ce qui en fait un matériau excellent à haute température ($1000^{\circ}\text{C} \pm 10^{\circ}\text{C}$) et dans les environnements corrosifs (tels que $\text{NaCl } 5\% \pm 0,1\%$). Il convient également au forage en eaux profondes, aux turbines d'aviation et aux pipelines chimiques. De plus, la microstructure optimisée réduit la concentration de contraintes ($< 250 \text{ MPa} \pm 50 \text{ MPa}$) causée par les cycles thermiques (ΔT $500^{\circ}\text{C} \pm 10^{\circ}\text{C}$), prolongeant ainsi la durée de vie.

8.3.5.2 Analyse de la résistance à la corrosion et du mécanisme de performance de la régulation de la microstructure du carbure cimenté

Français Le cœur du contrôle de la microstructure réside dans le raffinement des grains et l'homogénéité de phase. À une taille de grain de $0,51 \mu\text{m} \pm 0,01 \mu\text{m}$, la densité des joints de grains augmente à $> 10^4 \text{ mm}^2/\text{cm}^3 \pm 10^3 \text{ mm}^2/\text{cm}^3$, réduisant la pénétration des milieux corrosifs et le taux de perte de poids est $< 0,03 \text{ mg/cm}^2 \pm 0,01 \text{ mg/cm}^2$. Écart de distribution Ni $< 0,1\% \pm 0,02\%$. Assure la formation uniforme de la couche NiO (épaisseur $\sim 10 \text{ nm} \pm 1 \text{ nm}$), i_{corr} réduit à $< 7 \times 10^{-7} \text{ A/cm}^2 \pm 10^{-7} \text{ A/cm}^2$. Porosité $< 0,1\% \pm 0,02\%$ Élimine les vides résiduels grâce au procédé HIP, la densité atteint $99,7\% \pm 0,1\%$, améliore la résistance à l'oxydation (gain de poids $< 0,2$

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

$\text{mg/cm}^2 \pm 0,05 \text{ mg/cm}^2$). Dans un environnement oxydant à $1000^\circ\text{C} \pm 10^\circ\text{C}$, Cr_3C_2 ($0,2 \% - 0,5 \% \pm 0,01 \%$) affine les grains et forme une couche de Cr_2O_3 (épaisseur $0,1-0,2 \mu\text{m} \pm 0,05 \mu\text{m}$) , ce qui améliore la résistance à l'oxydation d'environ $50 \% \pm 5 \%$. L'adaptation des coefficients de dilatation thermique ($\text{WC } 5,2 \times 10^{-6} \text{K}^{-1}$, $\text{Ni } 13 \times 10^{-6} \text{K}^{-1}$, $\text{Cr}_3\text{C}_2 10 \times 10^{-6} \text{K}^{-1}$) réduit la contrainte thermique et la longueur des fissures de fatigue thermique est $< 0,02 \text{ mm} \pm 0,01 \text{ mm}$, ce qui améliore considérablement la stabilité à long terme.

8.3.5.3 Contrôle de la microstructure et microanalyse et vérification du carbure cémenté

au microscope électronique à balayage (MEB, résolution $< 0,1 \mu\text{m} \pm 0,01 \mu\text{m}$) ont montré que les grains étaient uniformes ($0,51 \mu\text{m} \pm 0,01 \mu\text{m}$) et que la porosité était $< 0,1 \% \pm 0,02 \%$ après régulation, tandis que les échantillons non régulés (grains $> 1 \mu\text{m} \pm 0,01 \mu\text{m}$) présentaient des trous (diamètre $\sim 0,3 \mu\text{m} \pm 0,01 \mu\text{m}$) . Français L'analyse par diffraction des rayons X (DRX) a confirmé que les intensités maximales de la phase WC ($2\theta \approx 35,6^\circ, 48,3^\circ$), de la phase Ni ($2\theta \approx 44,5^\circ$) et de la phase Cr_3C_2 ($2\theta \approx 39,4^\circ$) étaient uniformes, indiquant que la distribution de phase était optimisée. La spectroscopie dispersive en énergie (EDS) a montré que les teneurs en Ni et Cr aux joints de grains étaient respectivement de $8\%-10\% \pm 0,5\%$ et de $0,5\%-1\% \pm 0,1\%$, sans ségrégation. La spectroscopie photoélectronique à rayons X (XPS) a détecté le pic Ni 2p ($854 \text{ eV} \pm 0,1 \text{ eV}$) et le pic Cr 2p ($576,5 \text{ eV} \pm 0,1 \text{ eV}$), qui correspondaient au pic O 1s ($530 \text{ eV} \pm 0,1 \text{ eV}$), vérifiant la formation de couches NiO et Cr_2O_3 .

8.3.5.4 Analyse des facteurs affectant la microstructure du carbure cémenté

L'effet de la régulation de la microstructure est affecté par de nombreux facteurs et nécessite une régulation précise :

(1) Taille des grains

$0,51 \mu\text{m} \pm 0,01 \mu\text{m}$, perte de poids $< 0,03 \text{ mg/cm}^2 \pm 0,01 \text{ mg/cm}^2$, $i_{\text{corr}} < 7 \times 10^{-7} \text{ A/cm}^2 \pm 10^{-8} \text{ A/cm}^2$. Si $> 2 \mu\text{m} \pm 0,01 \mu\text{m}$, la densité des joints de grains diminue et le taux de perte de poids augmente de $20 \% \pm 5 \%$ (à $0,036 \text{ mg/cm}^2 \pm 0,01 \text{ mg/cm}^2$) , la profondeur des piqures augmente de $1,5 \mu\text{m} \pm 0,5 \mu\text{m}$ à $3 \mu\text{m} \pm 0,5 \mu\text{m}$.

(2) Distribution du Ni

Lorsque l'écart est $< 0,1 \% \pm 0,02 \%$, la couche de NiO est uniforme et i_{corr} est faible. Si l'écart est $> 0,5 \% \pm 0,1 \%$, l'enrichissement en Ni conduit à une augmentation de i_{corr} de $15 \% \pm 3 \%$ (à $1,05 \times 10^{-6} \text{ A/cm}^2 \pm 10^{-7} \text{ A/cm}^2$) , et le taux de perte de poids s'élève à $0,05 \text{ mg/cm}^2 \pm 0,01 \text{ mg/cm}^2$.

(3) Porosité

$< 0,1 \% \pm 0,02 \%$, densité $99,7 \% \pm 0,1 \%$, excellente résistance à l'oxydation (gain de poids $< 0,2 \text{ mg/cm}^2 \pm 0,05 \text{ mg/cm}^2$) . Si $> 0,5 \% \pm 0,02 \%$, la corrosion des pores est accélérée et i_{corr} augmente de $10 \% \pm 2 \%$ (à $7,7 \times 10^{-7} \text{ A/cm}^2 \pm 10^{-8} \text{ A/cm}^2$) .

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

(3) Température de frittage

À $1450^{\circ}\text{C} \pm 10^{\circ}\text{C}$, la microstructure est stable et le taux de perte de poids est faible. Si la température est $> 1500^{\circ}\text{C} \pm 10^{\circ}\text{C}$, la taille des grains augmente ($> 1 \mu\text{m} \pm 0,01 \mu\text{m}$) et i_{corr} augmente de $12\% \pm 2\%$ (atteignant $8,4 \times 10^{-7} \text{ A/cm}^2 \pm 10^{-8} \text{ A/cm}^2$).

(5) Humidité ambiante

Lorsque l'humidité $> 50\% \pm 5\%$, l'oxydation de surface s'accélère et i_{corr} augmente de $8\% \pm 2\%$ (jusqu'à $7,6 \times 10^{-7} \text{ A/cm}^2 \pm 10^{-8} \text{ A/cm}^2$), et un contrôle de l'humidité est nécessaire ($< 10\% \pm 1\%$).

Par exemple, un échantillon de WC-10Ni a une granulométrie de $2 \mu\text{m} \pm 0,01 \mu\text{m}$, une porosité de $0,6\% \pm 0,02\%$ et un taux de perte de poids de $0,07 \text{ mg/cm}^2$ dans le brouillard salin. $\pm 0,01 \text{ mg/cm}^2$, i_{corr} atteint $1,1 \times 10^{-6} \text{ A/cm}^2 \pm 10^{-7} \text{ A/cm}^2$. Le taux de perte de poids de la microstructure optimisée ($0,51 \mu\text{m} \pm 0,01 \mu\text{m}$, $< 0,1\% \pm 0,02\%$) est réduit à $0,02 \text{ mg/cm}^2 \pm 0,01 \text{ mg/cm}^2$. $i_{\text{corr}} < 7 \times 10^{-7} \text{ A/cm}^2 \pm 10^{-8} \text{ A/cm}^2$, résistance à la corrosion améliorée d'environ $64\% \pm 5\%$.

8.3.5.5 Stratégies de contrôle de la microstructure du carbure cémenté

Pour obtenir une perte de poids $< 0,03 \text{ mg/cm}^2 \pm 0,01 \text{ mg/cm}^2$ et un $i_{\text{corr}} < 7 \times 10^{-7} \text{ A/cm}^2 \pm 10^{-8} \text{ A/cm}^2$, la microstructure doit être contrôlée avec précision. Les stratégies recommandées incluent :

(1) Sélection de poudre et broyage à boulets

Les nanopoudres de WC (taille des particules $0,5 \mu\text{m} \pm 0,01 \mu\text{m}$), Ni ($8\% - 10\% \pm 1\%$) et Cr_3C_2 ($0,2\% - 0,5\% \pm 0,01\%$) ont été sélectionnées et broyées à boulets par voie humide (milieu éthanol anhydre, 40 heures ± 1 heure, rapport bille/matériau $10:1 \pm 0,5$). La taille des grains a été contrôlée à $0,51 \mu\text{m} \pm 0,01 \mu\text{m}$ et l'agglomération a été réduite ($< 0,1\% \pm 0,02\%$).

(2) Procédé de frittage

Frittage sous vide ($1450^{\circ}\text{C} \pm 10^{\circ}\text{C}$, pression $< 10^{-3} \text{ Pa} \pm 10^{-4} \text{ Pa}$, temps de maintien 1 heure $\pm 0,1$ heure), écart de distribution Ni $< 0,1\% \pm 0,02\%$, évitant la croissance des grains induite par $> 1500^{\circ}\text{C} \pm 10^{\circ}\text{C}$.

(3) Pressage isostatique à chaud (HIP)

Température $1200^{\circ}\text{C} \pm 10^{\circ}\text{C}$, pression $200 \text{ MPa} \pm 10 \text{ MPa}$, temps 1 heure $\pm 0,1$ heure, porosité réduite à $< 0,1\% \pm 0,02\%$, densité $99,7\% \pm 0,1\%$, profondeur de piqûres $< 1 \mu\text{m} \pm 0,5 \mu\text{m}$.

(4) Optimisation de la distribution de phase

L'alliage mécanique (MA, $200 \text{ tr/min} \pm 10 \text{ tr/min}$, $10 \text{ h} \pm 0,5 \text{ h}$) a été utilisé pour disperser uniformément Ni et Cr_3C_2 , réduire la ségrégation ($< 0,05\% \pm 0,01\%$) et améliorer la résistance aux joints de grains ($> 200 \text{ MPa} \pm 20 \text{ MPa}$).

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

(5) Contrôle environnemental

Maintenir une humidité $< 10 \% \pm 1 \%$ et une teneur en oxygène $< 0,01 \% \pm 0,001 \%$ pendant le frittage et le HIP pour réduire l'oxydation de surface (gain de poids $< 0,1 \text{ mg/cm}^2 \pm 0,05 \text{ mg/cm}^2$).

(6) Post-recuit

Le recuit à basse température ($500^\circ\text{C} \pm 10^\circ\text{C}$, $2 \text{ h} \pm 0,1 \text{ h}$) soulage les contraintes ($< 200 \text{ MPa} \pm 20 \text{ MPa}$) et stabilise la microstructure.

Ces stratégies garantissent des grains fins, une distribution de phase homogène, une résistance aux joints de grains $> 200 \text{ MPa} \pm 20 \text{ MPa}$ et une dureté ($> \text{HV } 1800 \pm 30$) et une ténacité ($K_{IC} > 12 \text{ MPa}\cdot\text{m}^{1/2} \pm 0,5 \text{ MPa}\cdot\text{m}^{1/2}$) maintenues.

8.3.5.6 Cas d'ingénierie de contrôle de la microstructure du carbure cémenté et comparaison des performances

En prenant comme exemple la microstructure optimisée WC-10Ni-0,2%Cr₃C₂ - TiN ($10 \mu\text{m} \pm 0,1 \mu\text{m}$) et le WC-10Ni non optimisé, après oxydation à $1000^\circ\text{C} \pm 10^\circ\text{C}$ pendant 100 heures ± 10 heures, l'échantillon optimisé a gagné $0,1 \text{ mg/cm}^2 \pm 0,05 \text{ mg/cm}^2$, $i_{\text{corr}} < 6 \times 10^{-7} \text{ A/cm}^2 \pm 10^{-8} \text{ A/cm}^2$, par rapport aux échantillons non optimisés $0,5 \text{ mg/cm}^2 \pm 0,05 \text{ mg/cm}^2$ et $1,1 \times 10^{-6} \text{ A/cm}^2 \pm 10^{-7} \text{ A/cm}^2$, et la résistance à l'oxydation est améliorée de Français $80 \% \pm 5 \%$. Dans l'essai au brouillard salin (NaCl $5 \% \pm 0,1 \%$, $2\,000 \text{ h} \pm 100 \text{ h}$), le taux de perte de poids est réduit à $0,01 \text{ mg/cm}^2 \pm 0,01 \text{ mg/cm}^2$, profondeur de piqûre $< 0,5 \mu\text{m} \pm 0,5 \mu\text{m}$, mieux que $0,07 \text{ mg/cm}^2 \pm 0,01 \text{ mg/cm}^2$ et $3,5 \mu\text{m} \pm 0,5 \mu\text{m}$ non optimisés. Dans les aubes de turbine d'aviation, la durée de vie des échantillons optimisés est $> 9\,000 \text{ heures} \pm 500 \text{ heures}$, ce qui est $80 \% \pm 5 \%$ plus longue que les $5\,000 \text{ heures} \pm 500 \text{ heures}$ non optimisées, et le taux de défaillance par fissure thermique est réduit d'environ $45 \% \pm 5 \%$.

8.3.5.7 Extension de l'application et limites du contrôle de la microstructure du carbure cémenté

Le contrôle de la microstructure permet au carbure cémenté de bien fonctionner dans des environnements à très haute température ($> 1100^\circ\text{C} \pm 10^\circ\text{C}$) et corrosifs, adapté aux buses de turbines à gaz (durée de vie $> 10^4 \text{ heures} \pm 10^3 \text{ heures}$) et aux trépan de forage en haute mer (résistance à la pression $> 30 \text{ MPa} \pm 2 \text{ MPa}$). Dans une atmosphère contenant du SO₂, le gain de poids de l'échantillon optimisé est $< 0,15 \text{ mg/cm}^2 \pm 0,05 \text{ mg/cm}^2$, mais un pH $< 1 \pm 0,1$ nécessite une optimisation du revêtement Al₂O₃ dans un acide fort. Le processus de contrôle nécessite une précision d'équipement élevée (environ deux fois le coût des processus traditionnels), et les coûts doivent être réduits par l'automatisation et la production de masse.

8.3.5.8 Orientation et perspectives d'avenir du contrôle et de l'optimisation de la microstructure du carbure cémenté

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

Pour améliorer encore l'effet, le frittage au plasma (SPS, température $1300^{\circ}\text{C} \pm 10^{\circ}\text{C}$, pression $50 \text{ MPa} \pm 5 \text{ MPa}$) peut être introduit pour réduire i_{corr} à $4 \times 10^{-7} \text{ A/cm}^2 \pm 10^{-8} \text{ A/cm}^2$. À des températures ultra-élevées ($> 1200^{\circ}\text{C} \pm 10^{\circ}\text{C}$), la granulométrie est optimisée à $0,3 \mu\text{m} \pm 0,01 \mu\text{m}$ et le gain de poids est $< 0,1 \text{ mg/cm}^2 \pm 0,05 \text{ mg/cm}^2$, dureté $> \text{HV } 1900 \pm 30$. À l'avenir, l'utilisation de poudres nanométriques (granulométrie $< 0,1 \mu\text{m} \pm 0,01 \mu\text{m}$) et la détection microscopique intelligente peuvent améliorer la précision du contrôle et s'étendre aux applications extrêmes de l'énergie et de l'aviation.

Le contrôle de la microstructure (granulométrie $0,51 \mu\text{m} \pm 0,01 \mu\text{m}$, écart de distribution du Ni $< 0,1 \% \pm 0,02 \%$, porosité $< 0,1 \% \pm 0,02 \%$) réduit significativement le taux de perte de poids ($< 0,03 \text{ mg/cm}^2$) en affinant les grains et en optimisant la distribution des phases $\pm 0,01 \text{ mg/cm}^2$) et le courant de corrosion ($i_{\text{corr}} < 7 \times 10^{-7} \text{ A/cm}^2 \pm 10^{-8} \text{ A/cm}^2$), la résistance à l'oxydation augmentée de $50 \% \pm 5 \%$, la dureté ($> \text{HV } 1800 \pm 30$) et la ténacité ($K_{\text{IC}} > 12 \text{ MPa} \cdot \text{m}^{1/2} \pm 0,5 \text{ MPa} \cdot \text{m}^{1/2}$). Granulométrie, distribution du Ni, La porosité, la température de frittage et l'humidité ambiante doivent être parfaitement régulées. Ce procédé est adapté aux environnements à haute température et corrosifs. À l'avenir, le procédé plasma et les nanotechnologies pourraient permettre d'élargir encore son champ d'application.

8.4 Essais et évaluation de la résistance à la corrosion et à haute température du carbure cimenté

8.4.1 Taux de corrosion du carbure cimenté (courbe de Tafel électrochimique)

Aperçu du principe et de la technologie du taux de corrosion du carbure cimenté

La vitesse de corrosion est mesurée par la courbe électrochimique de Tafel (selon la norme ASTM G59) pour mesurer la densité de courant de corrosion ($i_{\text{corr}} < 10^{-6} \text{ A/cm}^2 \pm 10^{-7} \text{ A/cm}^2$) et quantifier la résistance à la corrosion du carbure cimenté en milieux corrosifs tels que les milieux acides ($\text{pH} < 3 \pm 0,1$), les brouillards salins ($\text{NaCl } 5 \% \pm 0,1 \%$) et les milieux marins. La courbe de Tafel est basée sur la formule suivante :

$$\eta = b \cdot \log \left(\frac{i}{i_{\text{corr}}} \right)$$

Où η est la surtension (précision $\pm 0,01 \text{ V}$), b est la pente de Tafel (environ $0,1 \text{ V/décade} \pm 0,01 \text{ V/décade}$), i est la densité de courant (précision $\pm 10^{-9} \text{ A/cm}^2$) et i_{corr} est la densité de courant de corrosion. Faible i_{corr} et un potentiel de corrosion élevé ($E_{\text{corr}} > 0,2 \text{ V} \pm 0,02 \text{ V}$ par rapport à l'ECS) indiquent une excellente résistance à la corrosion. Le test utilise un système à trois électrodes (électrode de travail : carbure cimenté tel que WC10Ni, électrode de référence : électrode au calomel saturé ECS, électrode auxiliaire : électrode de platine). L'électrolyte contient $3,5 \% \pm 0,1 \%$ de NaCl ou $0,1 \text{ M} \pm 0,01 \text{ M}$ H_2SO_4 , et est équipé d'un poste de travail électrochimique de haute précision (précision du potentiel $\pm 0,001 \text{ V}$, précision du courant $\pm 10^{-9} \text{ A}$). Par exemple, l' i_{corr} du WC10Ni dans une solution de NaCl est d'environ $10^{-6} \text{ A/cm}^2 \pm 10^{-7} \text{ A/cm}^2$, et E_{corr} est d'environ $0,1 \text{ V} \pm 0,02 \text{ V}$, ce qui est nettement meilleur que $10^{-5} \text{ A/cm}^2 \pm 10^{-6} \text{ A/cm}^2$ et $-0,3 \text{ V} \pm 0,02 \text{ V}$ du WC10Co. Cette section combine le principe de la courbe de Tafel, la méthode d'essai et le cas

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

d'ingénierie pour discuter en détail de la méthode d'évaluation du taux de corrosion du carbure cémenté, fournissant une base scientifique pour optimiser la résistance à la corrosion.

8.4.1.2 Mécanisme et analyse du taux de corrosion du carbure cémenté

reflète la réponse électrochimique des matériaux dans les milieux corrosifs en quantifiant E_{corr} et i_{corr} . Le E_{corr} du WC10Ni est d'environ $0,1 \text{ V} \pm 0,02 \text{ V}$, ce qui est dû à la formation de la couche de passivation NiO (épaisseur $\sim 10 \text{ nm} \pm 1 \text{ nm}$, densité $\sim 6,7 \text{ g/cm}^3$) $\pm 0,1 \text{ g/cm}^3$ qui inhibe la diffusion de H^+ et Cl^- par inertie chimique ($K_{\text{sp}} \sim 10^{-15} \pm 10^{-16}$), ce qui entraîne une diminution de i_{corr} d'environ $50 \% \pm 5 \%$ par rapport au WC10Co. Le WC10Co présente une i_{corr} plus élevée ($10^{-5} \text{ A/cm}^2 \pm 10^{-6} \text{ A/cm}^2$) et forme des piqûres de corrosion (profondeur $< 5 \mu\text{m} \pm 0,5 \mu\text{m}$) dues aux réactions de dissolution du cobalt ($\text{Co} \rightarrow \text{Co}^{2+} + 2\text{e}^-$, $\Delta G > 0 \text{ kJ/mol} \pm 10 \text{ kJ/mol}$). L'ajout de Cr_3C_2 ($0,5 \% \pm 0,01 \%$) optimise encore les performances. Sa réaction à haute température ($4\text{Cr}_3\text{C}_2 + 13\text{O}_2 \rightarrow 6\text{Cr}_2\text{O}_3 + 8 \text{CO}$) génère une couche de Cr_2O_3 (épaisseur $\sim 10 \text{ nm} \pm 1 \text{ nm}$), qui agit en synergie avec NiO pour réduire l' i_{corr} de $40 \% \pm 5 \%$ supplémentaires (à $\sim 6 \times 10^{-7} \text{ A/cm}^2 \pm 10^{-8} \text{ A/cm}^2$). L'optimisation de la taille des grains à $0,5 \mu\text{m} \pm 0,01 \mu\text{m}$ réduit la zone d'exposition au Co ou au Ni ($< 10 \% \pm 1 \%$), réduit l' i_{corr} de $20 \% \pm 5 \%$ supplémentaires et améliore considérablement la résistance à la corrosion.

par microscopie électronique à balayage (MEB, résolution $< 0,1 \mu\text{m} \pm 0,01 \mu\text{m}$) a montré que le nombre de piqûres de corrosion WC10Ni était faible (profondeur $< 3 \mu\text{m} \pm 0,5 \mu\text{m}$), tandis que la profondeur des piqûres WC10Co était de $5 \text{ à } 10 \mu\text{m} \pm 0,5 \mu\text{m}$. La spectroscopie photoélectronique à rayons X (XPS) a détecté le pic Ni 2p ($854 \text{ eV} \pm 0,1 \text{ eV}$) et le pic Cr 2p ($577 \text{ eV} \pm 0,1 \text{ eV}$), qui correspondaient au pic O 1s ($530 \text{ eV} \pm 0,1 \text{ eV}$), confirmant la présence de couches NiO et Cr_2O_3 . Français La spectroscopie dispersive en énergie (EDS) a montré que la teneur en Co dans les piqûres de corrosion était réduite ($< 5 \% \pm 0,5 \%$), et que Ni et Cr étaient enrichis ($> 10 \% \pm 1 \%$), vérifiant l'effet protecteur de la couche de passivation. Dans des environnements difficiles avec un $\text{pH} < 2 \pm 0,1$ ou $\text{NaCl} > 5 \% \pm 0,1 \%$, i_{corr} peut augmenter jusqu'à $1,3 \times 10^{-6} \text{ A/cm}^2 \pm 10^{-7} \text{ A/cm}^2$ et doit être davantage optimisé en combinaison avec des revêtements de surface (tels que TiN).

8.4.1.3 Analyse des facteurs affectant la vitesse de corrosion du carbure cémenté

Le taux de corrosion est affecté par de nombreux facteurs et doit être optimisé de manière globale :

(1) Phase de liaison

Lorsque la teneur en Ni est de $10 \% \pm 1 \%$, $i_{\text{corr}} < 10^{-6} \text{ A/cm}^2 \pm 10^{-7} \text{ A/cm}^2$; lorsque la teneur en Co est $> 12 \% \pm 1 \%$, i_{corr} augmente de $50 \% \pm 5 \%$ (jusqu'à $\sim 1,5 \times 10^{-5} \text{ A/cm}^2 \pm 10^{-6} \text{ A/cm}^2$) car le Co s'oxyde plus facilement.

(2) Quantité d'ajout de Cr_3C_2

$0,5 \% \pm 0,01 \%$, i_{corr} diminue de $40 \% \pm 5 \%$; si $> 1 \% \pm 0,01 \%$, la formation de la phase η entraîne une diminution de la ténacité à la rupture (K_{Ic}) de $10 \% \pm 2 \%$ (à $\sim 11 \text{ MPa} \cdot \text{m}^{1/2} \pm 0,5$

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

$\text{MPa} \cdot \text{m}^{1/2}$), i_{corr} augmente légèrement à $7 \times 10^{-7} \text{ A/cm}^2 \pm 10^{-8} \text{ A/cm}^2$.

(3) Taille des grains

$0,51 \mu\text{m} \pm 0,01 \mu\text{m}$, i_{corr} est faible et la perte de poids est $< 0,03 \text{ mg/cm}^2 \pm 0,01 \text{ mg/cm}^2$; si $> 2 \mu\text{m} \pm 0,01 \mu\text{m}$, la densité des joints de grains diminue, i_{corr} augmente de $20 \% \pm 5 \%$ (atteignant $\sim 1,2 \times 10^{-6} \text{ A/cm}^2 \pm 10^{-7} \text{ A/cm}^2$), et la profondeur des piqûres augmente à $4 \mu\text{m} \pm 0,5 \mu\text{m}$.

(4) Conditions électrolytiques

Lorsque $\text{pH} < 2 \pm 0,1$, i_{corr} augmente de $30 \% \pm 5 \%$ (jusqu'à $\sim 1,3 \times 10^{-6} \text{ A/cm}^2 \pm 10^{-7} \text{ A/cm}^2$); lorsque $\text{NaCl} > 5 \% \pm 0,1 \%$, la surface de piqûres augmente de $20 \% \pm 5 \%$ (de $0,01 \text{ mm}^2 \pm 0,001 \text{ mm}^2$ à $0,012 \text{ mm}^2 \pm 0,001 \text{ mm}^2$).

(5) Rugosité de surface

$R_a < 0,05 \mu\text{m} \pm 0,01 \mu\text{m}$, j_{corr} reste faible; si $> 0,1 \mu\text{m} \pm 0,01 \mu\text{m}$, les microfissures augmentent et i_{corr} augmente de $10 \% \pm 2 \%$ (jusqu'à $\sim 1,1 \times 10^{-6} \text{ A/cm}^2 \pm 10^{-7} \text{ A/cm}^2$).

le j_{corr} d'un échantillon de WC12Co à $\text{pH} 1 \pm 0,1$ H_2SO_4 est d'environ $10^{-4} \text{ A/cm}^2 \pm 10^{-5} \text{ A/cm}^2$, tandis que celle de WC10Ni (ajout de Cr_3C_2 $0,5 \% \pm 0,01 \%$, granulométrie $0,5 \mu\text{m} \pm 0,01 \mu\text{m}$) n'est que de $10^{-6} \text{ A/cm}^2 \pm 10^{-7} \text{ A/cm}^2$, et la résistance à la corrosion est améliorée d'environ 1 000 fois $\pm 10 \%$.

8.4.1.4 Méthode d'essai pour la vitesse de corrosion du carbure cimenté

Pour m'assurer que j_{corr} Pour garantir la précision ($\pm 10^{-7} \text{ A/cm}^2$) et la fiabilité des données, les méthodes de test standardisées suivantes sont recommandées :

(1) Équipement

Un système à trois électrodes a été utilisé et équipé d'un poste de travail électrochimique de haute précision (précision du potentiel $\pm 0,001 \text{ V}$, précision du courant $\pm 10^{-9} \text{ A}$).

(2) Électrolyte

Utiliser $3,5 \% \pm 0,1 \%$ de NaCl ou $0,1 \text{ M} \pm 0,01 \text{ M}$ H_2SO_4 , plage de $\text{pH} 2-7 \pm 0,1$, température $25^\circ\text{C} \pm 1^\circ\text{C}$.

(3) Paramètres de test

Taux de balayage $0,1 \text{ mV/s} \pm 0,01 \text{ mV/s}$, plage de potentiel $\pm 0,25 \text{ V}$ par rapport à E_{corr} , durée du test $30 \text{ min} \pm 1 \text{ min}$.

(4) Préparation des échantillons

Poli à $R_a < 0,05 \mu\text{m} \pm 0,01 \mu\text{m}$, surface exposée $1 \text{ cm}^2 \pm 0,1 \text{ cm}^2$, test répété ≥ 3 fois.

(5) Analyse des données

i_{corr} (précision $\pm 10^{-7} \text{ A/cm}^2$) et E_{corr} (précision $\pm 0,02 \text{ V}$) ont été calculés par ajustement Tafel,

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

assurant une répétabilité de $> 95 \% \pm 2 \%$.

L' i_{corr} du WC10Ni ($R_a < 0,05 \mu\text{m} \pm 0,01 \mu\text{m}$) dans $3,5 \% \pm 0,1 \%$ de NaCl est d'environ $10^{-6} \text{ A/cm}^2 \pm 10^{-7} \text{ A/cm}^2$, et l' E_{corr} est d'environ $0,1 \text{ V} \pm 0,02 \text{ V}$. Les résultats des tests sont très cohérents, vérifiant la fiabilité de la méthode.

8.4.1.5 Application technique du taux de corrosion du carbure cimenté

Les tests de courbes électrochimiques de Tafel fournissent des données clés pour l'application technique du carbure cimenté :

(1) Équipement marin en carbure cimenté

Le WC10Ni (grain $0,5 \mu\text{m} \pm 0,01 \mu\text{m}$, Cr_3C_2 $0,5\% \pm 0,01\%$) en brouillard salin (NaCl $5\% \pm 0,1\%$) a un i_{corr} d'environ $10^{-6} \text{ A/cm}^2 \pm 10^{-7} \text{ A/cm}^2$ et un taux de perte de poids de $0,05 \text{ mg/cm}^2 \pm 0,01 \text{ mg/cm}^2$, une durée de vie $> 5 \text{ ans} \pm 0,5 \text{ ans}$, meilleure que $3 \text{ ans} \pm 0,3 \text{ ans}$ du WC10Co, une résistance à la corrosion améliorée d'environ $66\% \pm 5\%$, réduisant les coûts de maintenance du forage offshore d'environ $40\% \pm 5\%$.

(2) Vannes chimiques en alliage dur

Le WC8Co (Cr_3C_2 ajouté $0,5 \% \pm 0,01 \%$, $R_a < 0,05 \mu\text{m} \pm 0,01 \mu\text{m}$) a un i_{corr} d'environ $10^{-6} \text{ A/cm}^2 \pm 10^{-7} \text{ A/cm}^2$ dans $0,1 \text{ M} \pm 0,01 \text{ M}$ H_2SO_4 , une profondeur de piqure $< 2 \mu\text{m} \pm 0,5 \mu\text{m}$ et une durée de vie $> 2 \text{ ans} \pm 0,2 \text{ ans}$, soit $100 \% \pm 5 \%$ de plus que le WC8Co non optimisé (durée de vie $\sim 1 \text{ an} \pm 0,1 \text{ an}$), répondant aux exigences de transmission de fluides acides.

(3) Équipement de fabrication de papier en alliage dur

WC10Ni (grain $0,5 \mu\text{m} \pm 0,01 \mu\text{m}$, revêtement TiN $10 \mu\text{m} \pm 0,1 \mu\text{m}$) en solution de sulfate $i_{\text{corr}} < 10^{-6} \text{ A/cm}^2 \pm 10^{-7} \text{ A/cm}^2$, perte de poids $0,04 \text{ mg/cm}^2 \pm 0,01 \text{ mg/cm}^2$, durée de vie $> 4 \text{ ans} \pm 0,4 \text{ ans}$, ce qui est meilleur que les matériaux traditionnels (tels que l'acier inoxydable, durée de vie $\sim 2 \text{ ans} \pm 0,2 \text{ ans}$), et améliore la durabilité de l'équipement et l'efficacité de la production d'environ $50 \% \pm 5 \%$.

Ces cas montrent que les tests électrochimiques guident efficacement la sélection des matériaux et l'optimisation des performances du carbure cimenté dans les environnements corrosifs, garantissant la fiabilité et l'économie des applications d'ingénierie.

8.4.1.6 Extension de l'application et limites du taux de corrosion du carbure cimenté

Les essais de courbe de Tafel élargissent le potentiel d'application du carbure cimenté dans les environnements extrêmement corrosifs, tels que les acides forts avec un $\text{pH} < 2 \pm 0,1$ ou une salinité élevée avec NaCl $> 10 \% \pm 0,1 \%$. L' i_{corr} des échantillons revêtus de WC10Ni-TiN reste $< 8 \times 10^{-7} \text{ A/cm}^2 \pm 10^{-8} \text{ A/cm}^2$ et le taux de perte de poids est $< 0,05 \text{ mg/cm}^2 \pm 0,01 \text{ mg/cm}^2$. Cependant, à des températures élevées ($> 1000^\circ\text{C} \pm 10^\circ\text{C}$) ou dans une atmosphère contenant du SO_2 , une oxydation ou une contamination peut se produire à la surface de l'électrode, et l' i_{corr} peut

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

augmenter de $15 \% \pm 3 \%$, ce qui nécessite une optimisation en combinaison avec des essais d'oxydation à haute température. L'équipement de test est relativement coûteux (environ 100 000 à 200 000 RMB $\pm 10 000$), ce qui peut constituer une limitation pour les petites et moyennes entreprises, et les coûts doivent être réduits grâce à la normalisation et au partage des équipements.

8.4.1.7 Orientation de l'optimisation et perspectives d'avenir du taux de corrosion du carbure cimenté

Français Pour améliorer la précision du test, la spectroscopie d'impédance électrochimique dynamique (EIS, plage de fréquences 10^{-2} - 10^5 Hz ± 10 Hz) peut être introduite, et la précision de i_{corr} peut être améliorée à $\pm 10^{-8}$ A/cm². Dans un environnement supercorrosif (pH $< 1 \pm 0,1$), l'optimisation de l'électrolyte (comme l'ajout d'inhibiteurs) peut réduire i_{corr} à 5×10^{-7} A/cm² $\pm 10^{-8}$ A/cm². À l'avenir, la combinaison de l'analyse par intelligence artificielle des données Tafel et de la modification de surface à l'échelle nanométrique ($R_a < 0,03 \mu\text{m} \pm 0,01 \mu\text{m}$) peut améliorer la précision de la prédiction et s'étendre aux environnements extrêmes des grands fonds marins et aux nouvelles applications d'équipements énergétiques.

Français Le taux de corrosion est mesuré par la courbe de Tafel (ASTM G59) i_{corr} ($< 10^{-6}$ A/cm² $\pm 10^{-7}$ A/cm²) et E_{corr} ($> 0,2 \text{ V} \pm 0,02 \text{ V}$ vs. SCE), reflétant la résistance à la corrosion du carbure cimenté dans l'acide et le brouillard salin. Les couches de passivation NiO et Cr₂O₃ (épaisseur $\sim 10 \text{ nm} \pm 1 \text{ nm}$) réduisent i_{corr} d'environ 50%-90% $\pm 5\%$, et la taille des grains de $0,5 \mu\text{m} \pm 0,01 \mu\text{m}$ optimise encore les performances. Français Le test utilise un système à trois électrodes de haute précision (potentiel $\pm 0,001 \text{ V}$, courant $\pm 10^{-9} \text{ A}$), fournissant un support de données pour les applications marines (durée de vie $> 5 \text{ ans} \pm 0,5 \text{ an}$), chimiques ($> 2 \text{ ans} \pm 0,2 \text{ an}$) et papetières ($> 4 \text{ ans} \pm 0,4 \text{ an}$). Des facteurs tels que la phase de liaison, Cr₃C₂, la granulométrie, l'électrolyte et la rugosité de surface doivent être réglementés de manière exhaustive. À l'avenir, la résistance à la corrosion pourra être encore améliorée grâce à l'EIS et à la nano- modification.

8.4.2 Essai de dureté à haute température et de choc thermique du carbure cimenté

8.4.2.1 Aperçu des principes et des techniques d'essai de dureté à haute température et de choc thermique du carbure cimenté

La dureté à haute température ($> \text{HV } 1200 \pm 30$, $1000^\circ\text{C} \pm 10^\circ\text{C}$) et la résistance aux chocs thermiques (fissuration $< 0,05 \text{ mm} \pm 0,01 \text{ mm}$) sont des indicateurs clés pour évaluer la stabilité du carbure cimenté dans des environnements extrêmes (tels que les outils aéronautiques > 5000 heures ± 500 heures, les moules $> 10^5$ fois $\pm 10^4$ fois), qui sont quantifiés par l'essai de dureté Vickers (selon ASTM E92) et l'essai de choc thermique (selon ASTM E1876). Ces essais fournissent des données fiables sur la résistance à haute température du carbure cimenté afin de garantir qu'il répond aux exigences des applications techniques telles que la chimie (durée de vie $> 2 \text{ ans} \pm 0,2 \text{ an}$), la marine ($> 5 \text{ ans} \pm 0,5 \text{ an}$) et l'aviation (> 5000 heures ± 500 heures). Français À haute température, la phase Co se ramollit (la dureté chute à $\text{HV} \sim 200 \pm 30$), ce qui entraîne une diminution de la dureté

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

globale. Les cycles de chocs thermiques (1000°C à $25^{\circ}\text{C} \pm 1^{\circ}\text{C}$) induisent une contrainte thermique ($> 500 \text{ MPa} \pm 50 \text{ MPa}$), qui à son tour forme des microfissures. La stratégie d'optimisation améliore significativement les performances à haute température en introduisant du Cr_3C_2 ($0,5\% \pm 0,01\%$) et des revêtements (tels que TiN $5\text{-}10 \mu\text{m} \pm 0,1 \mu\text{m}$) pour augmenter la résistance aux joints de grains ($> 200 \text{ MPa} \pm 20 \text{ MPa}$) et la stabilité thermique. L'équipement d'essai comprend un duromètre Vickers haute température (charge $10 \text{ kg} \pm 0,1 \text{ kg}$, précision ± 30) et un four à choc thermique (précision du contrôle de la température $\pm 1^{\circ}\text{C}$). Par exemple, le WC10Co revêtu de TiN ($5 \mu\text{m} \pm 0,1 \mu\text{m}$) présente une dureté $> \text{HV } 1500 \pm 30$ à $1000^{\circ}\text{C} \pm 10^{\circ}\text{C}$ et une longueur de fissure de $0,03 \text{ mm} \pm 0,01 \text{ mm}$ après 500 ± 50 chocs thermiques. Cette section combine les principes de test, l'analyse des mécanismes et les cas d'ingénierie pour explorer de manière exhaustive les méthodes d'évaluation de la dureté à haute température et des performances aux chocs thermiques, et fournir des conseils scientifiques pour l'optimisation des matériaux.

8.4.2.2 Mécanisme et analyse de l'essai de dureté à haute température et de choc thermique du carbure cémenté

Français La dureté à haute température est significativement affectée par le ramollissement de la phase de liaison. À $1000^{\circ}\text{C} \pm 10^{\circ}\text{C}$, la phase Co du WC10Co se ramollit en raison du glissement du réseau (largeur de bande de glissement $\sim 0,5 \mu\text{m} \pm 0,1 \mu\text{m}$) et la dureté chute à $\text{HV } 1000 \pm 30$. L'ajout de Cr_3C_2 ($0,5\% \pm 0,01\%$) améliore la résistance aux joints de grains ($> 200 \text{ MPa} \pm 20 \text{ MPa}$) par diffusion de Cr (concentration aux joints de grains $\sim 5\% \pm 0,5\%$), et la dureté augmente d'environ $30\% \pm 5\%$ ($> \text{HV } 1300 \pm 30$). Le revêtement TiN (dureté $> \text{HV } 2000 \pm 50$, point de fusion $2950^{\circ}\text{C} \pm 50^{\circ}\text{C}$) maintient une dureté de surface $> \text{HV } 1500 \pm 30$ à $1000^{\circ}\text{C} \pm 10^{\circ}\text{C}$ avec une stabilité thermique élevée et un faible coefficient de dilatation thermique ($\sim 9 \times 10^{-6} \text{ K}^{-1} \pm 0,5 \times 10^{-6} \text{ K}^{-1}$), réduisant l'effet de ramollissement de la matrice. La granulométrie est optimisée à $0,5 \mu\text{m} \pm 0,01 \mu\text{m}$, ce qui réduit encore la zone d'exposition au Co ($< 10\% \pm 1\%$), réduit la perte de dureté d'environ $20\% \pm 5\%$ et améliore la résistance à l'usure à haute température.

Les fissures dues aux chocs thermiques sont provoquées par les contraintes thermiques, et leur ampleur est étroitement liée aux propriétés physiques et thermiques du matériau. La contrainte thermique peut être estimée par la formule suivante :

$$\sigma = E \cdot \alpha \cdot \Delta T$$

Où E est le module de Young ($\sim 600 \text{ GPa} \pm 10 \text{ GPa}$), α est le coefficient de dilatation thermique ($\sim 5 \times 10^{-6} \text{ K}^{-1} \pm 0,5 \times 10^{-6} \text{ K}^{-1}$), ΔT est la différence de température ($1000^{\circ}\text{C} \pm 10^{\circ}\text{C}$), et le résultat calculé est d'environ $300\text{-}500 \text{ MPa} \pm 50 \text{ MPa}$. Français La propagation des fissures suit la loi de Paris ($da/dN = C \cdot \Delta K^m$), les grains fins ($0,5 \mu\text{m} \pm 0,01 \mu\text{m}$) réduisent la vitesse de propagation ($< 10^{-7} \text{ mm/cycle} \pm 10^{-8} \text{ mm/cycle}$), et le revêtement TiN inhibe davantage la croissance des fissures (longueur $< 0,03 \text{ mm} \pm 0,01 \text{ mm}$). Les observations au microscope électronique à balayage (MEB, résolution $< 0,1 \mu\text{m} \pm 0,01 \mu\text{m}$) ont montré que les fissures étaient principalement des fractures intergranulaires (largeur $\sim 0,1 \mu\text{m} \pm 0,01 \mu\text{m}$), et les fissures dans les échantillons de revêtement TiN ont été considérablement réduites. La spectroscopie photoélectronique à rayons X (XPS) a détecté le pic $\text{Ti } 2p$ ($\sim 455 \text{ eV} \pm 0,1 \text{ eV}$), confirmant la stabilité thermochimique du TiN et

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

fournissant des preuves microscopiques de l'assurance des performances dans des environnements à haute température.

8.4.2.3 Analyse des facteurs affectant la dureté à haute température et l'essai de choc thermique du carbure cémenté

La dureté à haute température et la résistance aux chocs thermiques sont affectées par de nombreux facteurs et doivent être optimisées de manière exhaustive :

(1) Quantité d'ajout de Cr_3C_2

À $0,5 \% \pm 0,01 \%$, dureté $> \text{HV } 1500 \pm 30$, fissure de choc thermique $< 0,03 \text{ mm} \pm 0,01 \text{ mm}$; à $> 1 \% \pm 0,01 \%$, la formation de la phase η provoque une diminution de la ténacité à la rupture (K_{IC}) de $10 \% \pm 2 \%$ (à $\sim 11 \text{ MPa} \cdot \text{m}^{1/2} \pm 0,5 \text{ MPa} \cdot \text{m}^{1/2}$), et la fissure de choc thermique augmente légèrement à $0,04 \text{ mm} \pm 0,01 \text{ mm}$.

(2) Épaisseur du revêtement

TiN est de $5 \text{ à } 10 \mu\text{m} \pm 0,1 \mu\text{m}$, il y a peu de fissures et le taux d'écaillage est $< 5 \% \pm 1 \%$; s'il est $> 20 \mu\text{m} \pm 0,1 \mu\text{m}$, la contrainte interne augmente ($> 600 \text{ MPa} \pm 50 \text{ MPa}$), le taux d'écaillage augmente de $10 \% \pm 2 \%$ et la dureté diminue d'environ $5 \% \pm 1 \%$ (jusqu'à $\text{HV } 1425 \pm 30$).

(3) Taille des grains

$0,51 \mu\text{m} \pm 0,01 \mu\text{m}$, la dureté est élevée et la fissuration par choc thermique est faible. Si la granulométrie est supérieure à $2 \mu\text{m} \pm 0,01 \mu\text{m}$, la densité des joints de grains diminue, la fissuration par choc thermique augmente de $20 \% \pm 5 \%$ (jusqu'à $0,06 \text{ mm} \pm 0,01 \text{ mm}$) et la dureté chute à $\text{HV } 1100 \pm 30$.

(4) Différence de température

Lorsque $\Delta T > 500^\circ\text{C} \pm 10^\circ\text{C}$, la contrainte thermique augmente et la longueur de la fissure augmente de $50 \% \pm 5 \%$ (jusqu'à $0,075 \text{ mm} \pm 0,01 \text{ mm}$) ; si $\Delta T < 300^\circ\text{C} \pm 10^\circ\text{C}$, la longueur de la fissure est $< 0,02 \text{ mm} \pm 0,01 \text{ mm}$.

(5) Conductivité thermique

$> 80 \text{ W/m} \cdot \text{K} \pm 5 \text{ W/m} \cdot \text{K}$ (comme le WC10Ni-TiN), la contrainte thermique est dispersée et les fissures sont peu nombreuses. Si la contrainte thermique est $< 50 \text{ W/m} \cdot \text{K} \pm 5 \text{ W/m} \cdot \text{K}$ (comme le WC10Co non revêtu), les fissures augmentent de $15 \% \pm 3 \%$ (jusqu'à $0,055 \text{ mm} \pm 0,01 \text{ mm}$).

Par exemple, la dureté d'un certain WC12Co (non revêtu) chute à $\text{HV } 800 \pm 30$ à $1000^\circ\text{C} \pm 10^\circ\text{C}$, et la fissure atteint $0,08 \text{ mm} \pm 0,01 \text{ mm}$ après 500 ± 50 chocs thermiques ; tandis que la dureté du WC10Co (TiN $5 \mu\text{m} \pm 0,1 \mu\text{m}$, Cr_3C_2 $0,5 \% \pm 0,01 \%$) reste $> \text{HV } 1500 \pm 30$, et la fissure n'est que de $0,03 \text{ mm} \pm 0,01 \text{ mm}$, avec une amélioration significative des performances.

8.4.2.4 Méthodes d'essai pour la dureté à haute température et l'essai de choc thermique du

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

carbure cimenté

Pour garantir l'exactitude des tests et la cohérence des données, les méthodes standardisées suivantes sont recommandées :

(1) Essai de dureté à haute température

Utiliser un testeur de dureté Vickers, charge $10 \text{ kg} \pm 0,1 \text{ kg}$, température d'essai $1000^\circ\text{C} \pm 10^\circ\text{C}$, maintien 15 minutes ± 1 minute, précision de dureté ± 30 , points de mesure ≥ 5 points ± 1 point.

(2) Essai de choc thermique

Un four à choc thermique a été utilisé avec une température de cycle de 1000°C à $25^\circ\text{C} \pm 1^\circ\text{C}$, un nombre de cycles > 500 fois ± 50 fois, une vitesse de chauffage et de refroidissement de $10^\circ\text{C/s} \pm 1^\circ\text{C/s}$ et une précision de contrôle de température de $\pm 1^\circ\text{C}$.

(3) Mesure des fissures

en utilisant SEM (résolution $< 0,1 \mu\text{m} \pm 0,01 \mu\text{m}$) et la zone statistique était > 10 zones ± 1 zone.

(4) Préparation des échantillons

Polissage jusqu'à rugosité de surface $R_a < 0,05 \mu\text{m} \pm 0,01 \mu\text{m}$, taille de l'échantillon $20 \times 20 \times 5 \text{ mm} \pm 0,1 \text{ mm}$, répéter le test ≥ 3 fois.

(5) Analyse des données

La valeur moyenne de dureté est calculée (précision ± 30) et la statistique de longueur de fissure (écart type $< 0,01 \text{ mm}$) assurant une répétabilité de $> 95\% \pm 2\%$.

thermiques, la longueur de fissure du WC10Co ($\text{TiN } 5 \mu\text{m} \pm 0,1 \mu\text{m}$) était de $0,03 \text{ mm} \pm 0,01 \text{ mm}$ et la dureté était $> \text{HV } 1500 \pm 30$. Les résultats des tests étaient stables, vérifiant la fiabilité de la méthode.

8.4.2.5 Application technique de l'essai de dureté à haute température et de choc thermique du carbure cimenté

Les tests de dureté à haute température et de choc thermique fournissent des données de performance clés pour les applications techniques du carbure cimenté :

(1) Outils d'aviation en carbure

Le WC10Co ($\text{TiN } 5 \mu\text{m} \pm 0,1 \mu\text{m}$, $\text{Cr}_3\text{C}_2 0,5\% \pm 0,01\%$) a une dureté $> \text{HV } 1500 \pm 30$ à $1000^\circ\text{C} \pm 10^\circ\text{C}$, une fissure de choc thermique de $0,03 \text{ mm} \pm 0,01 \text{ mm}$ et une durée de vie de coupe > 5000 heures ± 500 heures, soit environ $66\% \pm 5\%$ de plus que le WC10Co non revêtu (durée de vie ~ 3000 heures ± 300 heures), répondant aux besoins du traitement aéronautique à haute résistance et réduisant le taux de défaillance causé par les fissures thermiques d'environ $40\% \pm 5\%$.

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

(2) Moule haute température en alliage dur

Le WC8Co (Cr_3C_2 0,5 % $\pm$ 0,01%) a une dureté de $> \text{HV} 1300 \pm 30$ à $900^\circ\text{C} \pm 10^\circ\text{C}$, une fissure de choc thermique $< 0,04 \text{ mm} \pm 0,01 \text{ mm}$ et une durée de vie $> 10^5$ fois $\pm 10^4$ fois, ce qui est environ 60% $\pm$ 5% plus élevé que le WC8Co non optimisé (durée de vie $\sim 6 \times 10^4$ fois $\pm 5 \times 10^3$ fois), améliorant ainsi la durabilité et l'efficacité de production du moule.

(3) Composants de turbine à gaz en carbure cimenté

WC10Co (Al_2O_3 10 $\mu\text{m} \pm 0,1 \mu\text{m}$) a une dureté de $> \text{HV} 1400 \pm 30$ à $1000^\circ\text{C} \pm 10^\circ\text{C}$, une fissure de choc thermique $< 0,03 \text{ mm} \pm 0,01 \text{ mm}$ et une durée de vie de $> 10^4$ heures $\pm 10^3$ heures, ce qui est meilleur que l'échantillon non revêtu (durée de vie ~ 7000 heures ± 700 heures), une augmentation d'environ 43% $\pm 5\%$, assurant la stabilité à long terme de la turbine à gaz dans un environnement à haute température.

Ces cas montrent que les tests de dureté à haute température et de choc thermique fournissent une base scientifique pour la conception des matériaux et l'optimisation de l'application du carbure cimenté, améliorant considérablement les performances techniques.

8.4.2.6 Extension et limites d'application de l'essai de dureté à haute température et de choc thermique du carbure cimenté

Français Les tests de dureté à haute température et de choc thermique étendent le potentiel d'application du carbure cimenté dans les environnements à très haute température ($> 1100^\circ\text{C} \pm 10^\circ\text{C}$) et à cycle thermique, tels que les buses de turbine à gaz (durée de vie $> 1,5 \times 10^4$ heures $\pm 10^3$ heures) et les aubes de moteurs aérospatiaux (choc thermique $> 10^6$ fois $\pm 10^4$ fois). L'échantillon revêtu de WC10Ni- Al_2O_3 a une dureté de $> \text{HV} 1400 \pm 30$ et des fissures $< 0,02 \text{ mm} \pm 0,01 \text{ mm}$ à $1100^\circ\text{C} \pm 10^\circ\text{C}$, montrant une excellente stabilité thermique. Cependant, à $\Delta T > 600^\circ\text{C} \pm 10^\circ\text{C}$ ou dans une atmosphère contenant du SO_2 , le revêtement peut se décoller ou s'oxyder, et la fissure augmente jusqu'à $0,05 \text{ mm} \pm 0,01 \text{ mm}$, ce qui doit être combiné avec des revêtements multicouches (tels que TiN / Al_2O_3) pour l'optimisation. Le coût des équipements de test est relativement élevé (environ 150 000 à 250 000 RMB ± 10 000 RMB), ce qui peut constituer un défi pour les petites et moyennes entreprises. Les coûts doivent être réduits grâce au partage des équipements et à la standardisation des processus.

8.4.2.7 Orientation d'optimisation et perspectives d'avenir des essais de dureté à haute température et de choc thermique du carbure cimenté

Français Pour améliorer les performances, un revêtement par projection plasma (température $800^\circ\text{C} \pm 10^\circ\text{C}$, épaisseur 10-15 $\mu\text{m} \pm 0,1 \mu\text{m}$) peut être introduit pour augmenter la dureté à $> \text{HV} 1600 \pm 30$ et réduire les fissures de choc thermique à $< 0,01 \text{ mm} \pm 0,01 \text{ mm}$. À des températures ultra-élevées ($> 1200^\circ\text{C} \pm 10^\circ\text{C}$), l'optimisation de la teneur en Cr_3C_2 à 0,7% $\pm 0,01\%$ et l'ajout de ZrO_2 (5% $\pm 0,5\%$) peuvent maintenir la dureté $> \text{HV} 1500 \pm 30$ et la longueur des fissures $< 0,015 \text{ mm} \pm 0,01 \text{ mm}$. À l'avenir, la combinaison de l'analyse de simulation par éléments finis des contraintes thermiques et de la technologie des nanograins (taille des grains $< 0,3 \mu\text{m} \pm 0,01 \mu\text{m}$) peut améliorer

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

la précision de la prédiction et la résistance aux chocs thermiques et s'étendre aux applications extrêmes des équipements aéronautiques et énergétiques.

La dureté à haute température ($> HV\ 1200 \pm 30$, $1000^{\circ}C \pm 10^{\circ}C$) et la résistance aux chocs thermiques (fissure $< 0,05\ mm \pm 0,01\ mm$) sont quantifiées par les tests ASTM E92 et E1876, reflétant la stabilité du carbure cémenté dans les environnements à haute température. Le revêtement Cr_3C_2 ($0,5\ \% \pm 0,01\ \%$) et TiN ($5-10\ \mu m \pm 0,1\ \mu m$) augmente la dureté d'environ $30\ \% \pm 5\ \%$ ($> HV\ 1500 \pm 30$) et la résistance aux joints de grains ($> 200\ MPa \pm 20\ MPa$), et une taille de grain de $0,5\ \mu m \pm 0,01\ \mu m$ réduit la propagation des fissures ($< 10^{-7}\ mm/cycle \pm 10^{-8}\ mm/cycle$). L'essai utilise un duromètre haute température (précision ± 30) et un four à choc thermique (contrôle de température $\pm 1\ ^{\circ}C$) pour fournir des données pour l'aviation (durée de vie $> 5\ 000\ heures \pm 500\ heures$), les moules ($> 10^5\ fois \pm 10^4\ fois$) et les turbines à gaz ($> 10^4\ heures \pm 10^3\ heures$). Des facteurs tels que la teneur en Cr_3C_2 , l'épaisseur du revêtement, la granulométrie, la différence de température et la conductivité thermique doivent être contrôlés de manière exhaustive. À l'avenir, le revêtement plasma et la nanotechnologie pourront encore optimiser les performances.

Références

ASTM E9217. (2017). Méthodes d'essai normalisées pour la dureté Vickers des matériaux métalliques. ASTM International.

ASTM E187615. (2015). Méthode d'essai normalisée pour le module de Young dynamique, le module de cisaillement et le coefficient de Poisson par excitation impulsionnelle de vibrations. ASTM International.

ASTM G5997. (2014). Méthode d'essai normalisée pour la réalisation de mesures de résistance de polarisation potentiodynamique. ASTM International.

ISO 9227:2017. (2017). Essais de corrosion en atmosphère artificielle — Essais au brouillard salin. Organisation internationale de normalisation.

Chen, L., et Wang, Z. (2022). Effet de la phase liante Ni sur la résistance à la corrosion des carbures cémentés à base de WC. *Chimie et physique des matériaux*, 280, 125789.

Li, X., et Zhang, Q. (2023). Étude de la résistance à l'oxydation des carbures cémentés à haute température. *Science et technologie des matériaux*, 41 (4), 567575.

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 :

Analyse comparative des moules en carbure cémenté à haute température et des moules en alliage de tungstène à haute densité

Les moules haute température sont utilisés dans des procédés tels que le forgeage à chaud, l'extrusion à chaud, le moulage sous pression et le moulage du verre. Ils doivent maintenir une dureté, une résistance à l'usure et une stabilité dimensionnelle élevées à des températures élevées (800–1600 °C), des pressions élevées (50–200 MPa) et des environnements corrosifs. Les moules haute température en carbure cémenté utilisent du carbure de tungstène (WC) comme matrice et sont largement utilisés dans le moulage de précision en raison de leur dureté et de leur résistance à la corrosion élevées. Les moules en alliage de tungstène haute densité sont principalement composés de tungstène (W), avec du nickel, du fer ou du cuivre comme phase liante. Ils présentent une densité élevée, une résistance élevée et une excellente résistance à la déformation à haute température, ce qui les rend adaptés aux applications à fortes charges et à haute température. Les deux ont des technologies de matériaux communes dans les domaines des buses d'aviation (résistance à l'érosion à haute température), des électrodes de cellules électrolytiques (résistance à la corrosion) et des composants de turbines à gaz (résistance à l'usure), mais leurs performances et leurs scénarios d'application ont des objectifs différents.

Le tableau suivant compare les propriétés des matériaux, le processus de fabrication, les performances, les applications et les limites des deux, fournissant une référence claire pour la sélection des matériaux de moule à haute température, soulignant en particulier les avantages et les applications uniques des moules en alliage de tungstène à haute densité.

projet	Moule en carbure haute température (WC-Co)	Moule en alliage de tungstène haute densité
Matériel composition	WC 85–95 % en poids , Co 5–15 % en poids , additifs TiC , Cr ₃ C ₂ facultatifs	W 90–97 % en poids , Ni/Fe/Cu 3–10 % (W-Ni-Fe ou W-Ni-Cu)
Propriétés des matériaux	Dureté : HV1000–1800 Densité : 14–15 g/cm ³ Point de fusion : WC 2870°C, Co limite la résistance à la température à ~1400°C Résistance à la flexion : 2 000–2 500 MPa Ténacité à la rupture : K _{IC} 10–15 MPa·m ^{1/2} Conductivité thermique : 80–100 W/ m·K Coefficient de dilatation thermique : 5–7×10 ⁻⁶ /°C	Dureté : HV300–600 Densité : 17–19 g/cm ³ Point de fusion : W 3422°C, résistance à la température > 1600°C Résistance à la flexion : 800–1500 MPa Ténacité à la rupture : K _{IC} 20–30 MPa·m ^{1/2} Conductivité thermique : 100–150 W/ m·K Coefficient de dilatation thermique : 4,5–6×10 ⁻⁶ /°C
Processus de fabrication	Métallurgie des poudres : poudre ultrafine WC/Co (0,2–2 μm) → pressage isostatique à froid (NEP) → frittage sous vide (1 350–1 450 °C) → usinage de précision (rectification au diamant) Revêtement PVD/CVD (TiN , Al ₂ O ₃ , 2–20 μm) , projection thermique APS/DGS (WC-Co, 50–500 μm) Ingénierie d'interface : revêtement de gradient,	Métallurgie des poudres : poudre W/Ni/Fe → pressage ou moulage par injection → frittage en phase liquide (1450–1550 °C) → usinage Modification de surface : cémentation, nitruration ou revêtement Cr/ CrN (5–50 μm) , projection thermique (par exemple WC-Co, 50–200 μm) Traitement thermique : Recuit (800–1000°C) pour augmenter

	implantation ionique	la ténacité
Avantages en termes de performances	Haute résistance à l'usure : dureté HV1000-1800, revêtement (comme TiAlN, Al₂O₃) réduisant l'usure de 50 à 70 %, adapté aux conditions de frottement élevé. Lors du forgeage à chaud des alliages de titane aéronautique, le taux d'usure est réduit de 60 %. Excellente résistance à la corrosion : il résiste à la corrosion acide, alcaline, oxydative et due au métal en fusion, réduisant ainsi le taux de corrosion de 70 %. Dans les moules de formage du verre, il résiste à la corrosion due au verre en fusion et augmente sa durée de vie de 50 %. Rétention de dureté à haute température : la dureté diminue de 10 à 15 % à 1400 °C, adaptée au moulage de précision. Stabilité dimensionnelle : faible coefficient de dilatation thermique ($5-7 \times 10^{-6} / ^\circ\text{C}$), écart dimensionnel $< 0,01$ mm et la précision des pièces forgées pour l'aviation est améliorée de 20 %. Performance anti-fatigue : le revêtement dégradé soulage les contraintes thermiques et augmente la durée de vie en fatigue de 30 %.	Résistance à des températures extrêmement élevées : la résistance à la flexion reste à 800–1200 MPa à 1600 °C, avec une excellente résistance au fluage, adaptée à l'extrusion sous forte charge. Haute ténacité : ténacité à la rupture $K_{IC} 20-30 \text{ MPa} \cdot \text{m}^{1/2}$, forte résistance aux chocs, taux de fissuration par impact réduit de 60 %. Excellente résistance à la fatigue thermique : conductivité thermique élevée ($100-150 \text{ W/m} \cdot \text{K}$), les fissures thermiques sont réduites de 50 % et la durée de vie en fatigue est augmentée de 30 %. Haute densité et résistance à la déformation : densité 17-19 g/cm³, taux de déformation $< 0,1$ %, adapté au moulage haute pression. Bonne usinabilité : des formes complexes peuvent être usinées et le cycle de fabrication est raccourci de 15 à 20 %.
limitation	Faible ténacité ($K_{IC} 10-15 \text{ MPa} \cdot \text{m}^{1/2}$), sujet à la fissuration Haute densité ($14-15 \text{ g/cm}^3$) et lourd Coût de fabrication élevé (équipement 10 à 30 millions de RMB, moule 50 à 500 000 RMB) La résistance à la température est limitée par la phase Co ($< 1400^\circ\text{C}$)	Faible dureté (HV 300-600), résistance à l'usure insuffisante, renforcement de surface requis Très haute densité ($17-19 \text{ g/cm}^3$), ajoutant du poids Le coût des ressources en tungstène est élevé (500 000 à 800 000 RMB par tonne). Faible résistance à la corrosion, nécessite un revêtement protecteur
Applications et utilisations	Aérospatiale : matrices de forgeage à chaud (alliages de titane, pièces forgées en alliages à base de nickel, 800–1200 °C), matrices d'extrusion à chaud (pièces structurales aérospatiales, 1000–1300 °C) Fabrication automobile : matrices de moulage sous pression (alliage d'aluminium, pièces en alliage de magnésium, 600–800 °C), matrices d'emboutissage à chaud (plaques d'acier à haute résistance, 700–900 °C) Industrie énergétique : matrices de forgeage à chaud pour engrenages d'éoliennes (ébauches d'engrenages 42CrMo, 800–1100 °C), matrices d'extrusion à chaud pour composants d'énergie nucléaire (1000–1200 °C) Industrie électronique : moules de moulage du verre (verre optique, écrans de téléphones portables, 1 000 à 1 300 °C),	Aéronautique : matrices d'extrusion haute température (alliages haute température, alliages de titane, 1200–1600°C), matrices de forgeage à chaud (gros composants aéronautiques, 1000–1400°C) Industrie de l'énergie : matrices d'extrusion à chaud pour composants d'énergie nucléaire (tubes en alliage de zirconium, 1 000 à 1 400 °C), matrices de forgeage à chaud robustes pour ébauches d'engrenages d'éoliennes (800 à 1 200 °C) Fabrication automobile : matrices d'emboutissage à chaud robustes (acier à très haute résistance, 900–1100 °C) Industrie métallurgique : filières d'extrusion à chaud robustes pour métaux non ferreux (cuivre, alliages d'aluminium, 800–1200°C) Industrie de la défense : matrices de formage de noyaux

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

	moules d'emballage de semi-conducteurs (800 à 1 000 °C) Industrie métallurgique : matrices de forgeage à chaud pour métaux non ferreux (cuivre, alliages d'aluminium, 600–900°C) Boîtier : Matrice de forgeage à chaud en alliage de titane aéronautique, revêtement PVD- TiN , durée de vie prolongée de 40 %, efficacité de formage +20 %	perforants (1 000 à 1 300 °C), matrices de forgeage à chaud pour composants haute densité Boîtier : Tube en alliage de zirconium pour énergie nucléaire, filière d'extrusion à chaud, revêtement CrN , résistance à la température 1400°C, durée de vie prolongée de 30%
Effet de moisissure haute température	Résistance à l'usure : Revêtements (tels que Al₂O₃ , Le TiAlN réduit l'usure de 50 à 70 % et prolonge la durée de vie de 5 000 à 8 000 fois. Lors du forgeage à chaud des alliages de titane aéronautique (1 000 °C, 100 MPa), le taux de barrage est réduit de 60 % et la durée de vie est jusqu'à 8 000 fois supérieure à celle des moules traditionnels. Résistance à la corrosion : Anti-oxydation, corrosion acide, alcaline et métal fondu. Le taux de corrosion est réduit de 70 % et le cycle de maintenance est prolongé de 30 %. Pour le moulage du verre (1 200 °C), il résiste à la corrosion du verre fondu, sa durée de vie est augmentée de 50 % et il ne présente aucune piqure visible en surface. Résistance aux hautes températures : la dureté reste de HV900–1500 à 1400 °C, avec un taux de déformation à inférieur à 0,1 %. Dans les moules d'encapsulation de semi-conducteurs (1000 °C), la stabilité à haute température assure un fonctionnement continu jusqu'à 5000 fois. Résistance à la fatigue : Le revêtement à gradient réduit les contraintes thermiques, augmente la durée de vie en fatigue de 30 % et réduit les fissures thermiques de 50 %. Dans le moulage sous pression d'alliages d'aluminium pour l'automobile (700 °C), la durée de vie est multipliée par 4 000 à 6 000. Précision dimensionnelle : écart dimensionnel < 0,01 mm, déformation par dilatation thermique < 0,05 % et taux de qualification des produits finis augmenté de 25 % (90 % → 95 %). Efficacité de moulage : la dureté élevée et la résistance à l'usure réduisent la maintenance et augmentent l'efficacité de 20 à 25 %.	Résistance aux hautes températures : taux de déformation < 0,1 % à 1 600 °C, résistance à la flexion maintenue entre 800 et 1 200 MPa, durée de vie 4 000 à 6 000 fois. Pour l'extrusion de tubes en alliage de zirconium pour centrales nucléaires (1 400 °C, 150 MPa), la durée de vie est 6 000 fois supérieure à celle des moules en acier ordinaires (2 000 fois). Résistance à la fatigue thermique : une conductivité thermique élevée (100–150 W/ m· K) réduit la fissuration thermique de 50 % et augmente la durée de vie en fatigue de 30 %. En emboutissage à chaud intensif (1 100 °C), le taux de fissuration est réduit de 12 % à 5 %. Résistance aux chocs : ténacité K_{IC} de 20 à 30 MPa·m^{1/2} , taux de fissuration par impact réduit de 60 %. Lors du forgeage à chaud d'alliages aéronautiques haute température (1 200 °C, 200 MPa), la matrice ne se fissure pas et sa durée de vie est multipliée par 5 000. Précision dimensionnelle : écart dimensionnel < 0,015 mm, déformation par dilatation thermique < 0,08 % et taux de qualification des produits finis augmenté de 20 % (85 % → 90 %). Efficacité de formage : La densité élevée et la résistance à la déformation réduisent les temps d'arrêt et augmentent l'efficacité de 15 à 20 %. Résistance à l'usure (revêtement requis) : Le revêtement CrN ou WC-Co réduit l'usure de 40 à 50 % et augmente la durée de vie de 20 %. Pour le moulage de noyaux perforants (1 300 °C), la durée de vie du moule de revêtement est multipliée par 3 000 à 4 000.

illustrer:

Composition du matériau : Aperçu de la composition chimique du carbure cémenté et de l'alliage de tungstène haute densité.

Propriétés des matériaux : comparez les paramètres clés tels que la dureté, la densité, le point de

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

fusion, la résistance, etc.

Procédé de fabrication : résume les procédés de moulage, de frittage, de modification de surface, etc.

Performances et limites : Analyser les avantages et les inconvénients de la résistance à l'usure, de la résistance à la température, du coût, etc.

Scénarios d'application : Lister les utilisations et les cas dans l'aérospatiale, l'énergie, l'automobile, la métallurgie, la défense et d'autres domaines.

Effet de moule à haute température : quantifier les effets de la résistance à l'usure, de la résistance à la corrosion, de la résistance aux hautes températures, de la résistance à la fatigue, de la précision dimensionnelle, de l'efficacité du moulage, etc.

Analyse comparative et résumé des moules haute température en carbure cimenté et des moules en alliage de tungstène haute densité

Les moules haute température en carbure cimenté et en alliage de tungstène haute densité présentent des avantages spécifiques pour le moulage haute température et conviennent à différentes conditions de travail et applications. Les moules en WC-Co offrent d'excellentes performances pour le forgeage à chaud de précision, le moulage sous pression et le moulage du verre grâce à leur dureté élevée (HV1000–1800) et leur excellente résistance à l'usure (taux d'usure réduit de 50 à 70 %). Ils sont particulièrement adaptés aux environnements à températures inférieures à 1400 °C, à leur haute précision (écart dimensionnel < 0,01 mm) et à leur résistance à la corrosion. Leurs revêtements PVD/CVD (TiN, Al₂O₃) et leur technologie de projection thermique haute énergie (APS/DGS) améliorent considérablement l'efficacité des moules haute température. Par exemple, la durée de vie des moules de forgeage à chaud en alliage de titane pour l'aviation est multipliée par 8 000 et leur rendement est augmenté de 25 %. Son excellente résistance à la corrosion (taux de corrosion réduit de 70 %) le rend résistant à l'érosion par les matières fondues dans le moulage du verre et le conditionnement des semi-conducteurs, et son cycle de maintenance est prolongé de 30 %. Cependant, les moules en WC-Co présentent une faible ténacité (K_{IC} 10–15 MPa·m^{1/2}), sont sujets aux fissures sous fort impact et présentent des coûts de fabrication élevés (50 000–500 000 yuans), ce qui limite leur application aux moules de grande taille.

Les matrices en alliage de tungstène haute densité sont réputées pour leur résistance à très haute température (taux de déformation < 0,1 % à 1 600 °C) et leur ténacité élevée (K_{IC} 20–30 MPa·m^{1/2}). Elles conviennent parfaitement aux applications d'extrusion et de forgeage à chaud sous fortes charges et hautes températures. Leur densité élevée (17–19 g/cm³) et leurs propriétés antidéformation garantissent un fonctionnement stable de la matrice sous haute pression (150–200 MPa). Par exemple, la durée de vie des matrices d'extrusion de tubes en alliage de zirconium nucléaire est multipliée par 6 000, avec un rendement accru de 20 %. Leur conductivité thermique élevée (100–150 W/m·K) réduit la fissuration thermique de 50 % et convient aux conditions de charge cyclique, telles que l'emboutissage à chaud sous fortes charges des automobiles.

Cependant, les alliages de tungstène haute densité présentent une faible dureté (HV300–600), une

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

résistance à l'usure insuffisante et nécessitent des revêtements CrN ou WC-Co pour améliorer leurs performances, ainsi qu'une faible résistance à la corrosion (revêtements de protection requis). Les ressources en tungstène sont rares (500 000 à 800 000 RMB par tonne) et une densité extrêmement élevée augmente le poids et le coût, limitant ainsi son application dans les moules légers.

Suggestions de sélection de matériaux pour les moules en carbure cémenté haute température et les moules en alliage de tungstène haute densité

Moules de précision et de petite taille (tels que les pièces forgées pour l'aviation, les moules en verre, le moulage sous pression pour l'automobile)

Les matrices en carbure sont supérieures, avec une résistance élevée à l'usure, une précision et une longue durée de vie (5 000 à 8 000 fois).

Moules à charge lourde et haute température (tels que l'extrusion à haute température, les composants de l'énergie nucléaire, le moulage de noyaux perforants)

Les moules en alliage de tungstène haute densité sont plus adaptés, avec une résistance à la déformation exceptionnelle et une ténacité élevée.

Équilibre entre coût et durée de vie

Les moules WC-Co ont de faibles coûts de maintenance et conviennent à une utilisation à haute fréquence ; les moules en alliage de tungstène haute densité ont une bonne aptitude au traitement et conviennent aux charges lourdes mais nécessitent un renforcement de surface.

Similaires aux exigences techniques des buses d'aviation (revêtements résistants à l'érosion à haute température), des électrodes d'électrolyseur (revêtements résistants à la corrosion) et des composants de turbines à gaz (revêtements résistants à l'usure), les deux reposent sur la modification de surface et l'ingénierie d'interface (comme les revêtements à gradient, l'implantation ionique) pour optimiser les performances.

À l'avenir, en développant du WC-Co nano-grainé, des revêtements composites multicouches, des procédés de frittage à basse température, des revêtements résistants à l'usure en alliages de tungstène haute densité et des technologies de fabrication additive, les moules à haute température amélioreront encore leurs performances et leur économie dans les domaines de l'aviation, de l'énergie, de l'automobile, de la métallurgie, de la défense nationale, etc., offrant un soutien solide à une fabrication industrielle efficace et durable.

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

Annexe :

Analyse comparative des moules haute température en carbure cémenté et des moules en alliage titane-zirconium-molybdène (TZM)

Les moules haute température sont soumis à des températures extrêmement élevées (800–1800 °C), à des pressions élevées (50–200 MPa) et à des environnements corrosifs dans des procédés tels que le forgeage à chaud, l'extrusion à chaud, le moulage sous pression et le moulage du verre. Ces procédés exigent des matériaux présentant une excellente dureté, une résistance à l'usure, une résistance aux hautes températures et une stabilité dimensionnelle. Les moules en carbure haute température (WC-Co) sont largement utilisés dans le moulage de précision en raison de leur dureté et de leur résistance à la corrosion élevées ; les moules en alliage titane-zirconium-molybdène (TZM) conviennent aux applications à très haute température et aux moules de grande taille grâce à leur excellente résistance aux hautes températures et au fluage. Ces deux matériaux partagent des technologies communes dans les domaines des tuyères aéronautiques (résistance à l'érosion à haute température), des électrodes de cellules électrolytiques (résistance à la corrosion), des fraises à engrenages pour éoliennes (résistance à l'usure), etc.

Cet article fournit une référence complète pour le choix des matériaux en comparant leurs propriétés, leurs procédés de fabrication, leurs avantages en termes de performances, leurs domaines d'application, leurs limites et les effets des moules à haute température. L'étude des effets des moules à haute température a été enrichie de données quantitatives détaillées et d'études de cas concernant la résistance à l'usure, à la corrosion, aux hautes températures, à la fatigue, la précision dimensionnelle et l'efficacité du moulage. Les domaines d'application couvrent l'aérospatiale, l'énergie, l'automobile, l'électronique, la métallurgie et d'autres industries.

tableau des moules haute température en carbure cémenté et des moules en alliage titane-zirconium-molybdène (TZM)

projet	Moule en carbure haute température (WC-Co)	Moule en alliage de titane, zirconium et molybdène (TZM)
Matériel composition	WC 85–95 % en poids , Co 5–15 % en poids , additifs TiC , Cr ₃ C ₂ facultatifs	Mo 99 à 99,5 % en poids , Ti 0,4 à 0,55 %, Zr 0,06 à 0,12 %, trace de C
Propriétés des matériaux	Dureté : HV1000–1800 Densité : 14–15 g/cm ³ Point de fusion : WC 2870°C, Co limite la résistance à la température à ~1400°C Résistance à la flexion : 2 000–2 500 MPa Ténacité à la rupture : K _{IC} 10–15 MPa·m ^{1/2} Conductivité thermique : 80–100 W/ m·K Coefficient de dilatation thermique : 5–7×10 ⁻⁶ /°C	Dureté : HV250–350 Densité : 10,2 g/cm ³ Point de fusion : ~2620°C, résistance à la température >1600°C Résistance à la flexion : 800–1200 MPa Ténacité à la rupture : K _{IC} 15–20 MPa·m ^{1/2} Conductivité thermique : 110–140 W/ m·K Coefficient de dilatation thermique : 5,3–5,5×10 ⁻⁶ / °C
Processus de fabrication	Métallurgie des poudres : poudre ultrafine WC/Co (0,2–2 μm) → pressage isostatique à froid (NEP) → frittage sous vide (1 350–1 450 °C) → usinage de précision (rectification au diamant)	Métallurgie des poudres : poudre Mo/Ti/Zr → pressage isostatique à chaud (HIP, 1700–2000 °C) → forgeage/laminage → usinage CNC Modification de surface : revêtement d'oxyde (par exemple

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

	Revêtement PVD/CVD (TiN , Al₂O₃ , 2–20 μ m) , projection thermique APS/DGS (WC-Co, 50–500 μ m) Ingénierie d'interface : revêtement à gradient, implantation ionique	MoSi₂ , 10–50 μ m) ou nitruration Traitement thermique : Recuit (1000–1200°C) pour augmenter la ténacité
Avantages en termes de performances	Haute résistance à l'usure : Dureté HV1000-1800, revêtement (TiAlN , Al₂O₃) réduisant l'usure de 50 à 70 % , adapté aux conditions de frottement élevé (forgeage à chaud, moulage sous pression, etc.). Lors du forgeage à chaud d'alliages de titane aéronautique, le taux d'usure est réduit de 60 % et la durée de vie de l'outil est multipliée par 8 000. Excellente résistance à la corrosion : il résiste à la corrosion acide, alcaline, à l'oxydation et au métal fondu, avec un taux de corrosion réduit de 70 % et un cycle de maintenance prolongé de 30 %. Dans les moules de formage du verre, il résiste à la corrosion du verre fondu et sa durée de vie est augmentée de 50 % . Rétention de dureté à haute température : la technologie de revêtement améliore la résistance à la température jusqu'à 1400 °C, la dureté ne diminuant que de 10 à 15 % , ce qui la rend adaptée au moulage de précision (comme le verre optique, 1000 à 1300 °C). Stabilité dimensionnelle : Faible coefficient de dilatation thermique (5–7×10⁻⁶ /°C), écart dimensionnel < 0,01 mm, garantissant un formage de haute précision et améliorant la précision des pièces forgées pour l'aviation de 20 %. Résistance à la fatigue : l'ingénierie d'interface (comme le revêtement à gradient) soulage les contraintes thermiques et augmente la durée de vie en fatigue de 30 % , ce qui la rend adaptée aux conditions de charge cyclique (comme le moulage sous pression automobile).	Résistance à très haute température : la résistance à la flexion est maintenue entre 800 et 1 000 MPa à 1 600 et 1 800 °C, sans fluage, ce qui convient à l'extrusion à très haute température. La filière en alliage haute température fonctionne à 1 600 °C et offre une durée de vie de 6 000 fois. Excellente résistance à la fatigue thermique : sa conductivité thermique élevée (110–140 W/ m· K) permet une dissipation rapide de la chaleur, réduisant les fissures thermiques de 60 % et augmentant la durée de vie en fatigue de 25 % . Dans les matrices de pressage isostatique à chaud, il présente une excellente résistance aux chocs thermiques. Haute ténacité : ténacité à la rupture K_{IC} 15–20 MPa·m^{1/2} , forte résistance aux chocs, adapté aux conditions de contraintes élevées (telles que l'emboutissage à haute température), taux de fissuration par impact réduit de 50 %. Bonne aptitude au traitement : l'usinage CNC de formes complexes est possible et le cycle de fabrication des moules est raccourci de 20 % , ce qui convient aux grands moules (tels que les moules d'extrusion d'énergie nucléaire). Stabilité dimensionnelle : coefficient de dilatation thermique 5,3–5,5×10⁻⁶ /°C, écart dimensionnel < 0,02 mm, adapté au moulage haute température de grande taille (comme les moules en céramique).
limitation	Faible ténacité (K_{IC} 10–15 MPa·m^{1/2}) , sujet à la fissuration Haute densité (14–15 g/cm³) et lourd Coût de fabrication élevé (équipement 10 à 30 millions de RMB, moule 50 à 500 000 RMB) La résistance à la température est limitée par la phase Co (<1400°C)	Faible dureté (HV250–350), résistance à l'usure insuffisante Facile à oxyder (> 600 °C), nécessite un revêtement protecteur Coût élevé des ressources en molybdène (200 000 à 300 000 RMB par tonne) Fragilité à basse température, fonctionnement à haute température requis
Applications et utilisations	Aérospatiale : matrices de forgeage à chaud (alliages de titane, pièces forgées en alliages à base de nickel, 800–	Aéronautique : filières d'extrusion haute température (alliages haute température, alliages de titane, 1200–1600°C), filières de

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

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

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

	1200 °C), matrices d'extrusion à chaud (pièces structurales aérospatiales, 1000–1300 °C) Fabrication automobile : matrices de moulage sous pression (alliage d'aluminium, pièces en alliage de magnésium, 600–800 °C), matrices d'emboutissage à chaud (plaques d'acier à haute résistance, 700–900 °C) Industrie énergétique : matrices de forgeage à chaud pour engrenages d'éoliennes (ébauches d'engrenages 42CrMo, 800–1100 °C), matrices d'extrusion à chaud pour composants d'énergie nucléaire (1000–1200 °C) Industrie électronique : moules de moulage du verre (verre optique, écrans de téléphones portables, 1 000 à 1 300 °C), moules d'emballage de semi-conducteurs (800 à 1 000 °C) Industrie métallurgique : matrices de forgeage à chaud pour métaux non ferreux (cuivre, alliages d'aluminium, 600–900°C) Boîtier : Matrice de forgeage à chaud en alliage de titane aéronautique, revêtement PVD- TiN , durée de vie prolongée de 40 %, efficacité de formage +20 %	pressage isostatique à chaud (disques de turbines d'avions, 1400–1800°C) Industrie énergétique : fours à haute température (fours de frittage sous vide, fours de traitement thermique, > 1600 °C), filières d'extrusion à haute température pour l'énergie nucléaire (tubes en alliage de zirconium, 1200–1500 °C) Fabrication automobile : matrices d'emboutissage à haute température (acier à très haute résistance, 900–1100 °C) Industrie électronique : matrices de formage de céramique à haute température (zircone, nitrure de silicium, 1400–1600 °C) Industrie métallurgique : moules de coulée continue d'alliages à haute température (alliages à base de nickel, 1300–1600°C) Boîtier : Matrice d'extrusion en alliage haute température, revêtement MoSi₂ , résistance à la température 1600°C, durée de vie prolongée de 30%, efficacité de moulage +15 %
Effet de moisissure à haute température	Résistance à l'usure : Revêtements (tels que Al₂O₃ , Le TiAlN réduit l'usure de 50 à 70 % et prolonge la durée de vie de l'outil de 5 000 à 8 000 fois. Lors du forgeage à chaud des alliages de titane aéronautique (1 000 °C, 100 MPa), le taux d'usure est réduit de 60 % et la durée de vie est jusqu'à 8 000 fois supérieure à celle des outils traditionnels (4 000 fois). Résistance à la corrosion : Anti-oxydation, corrosion acide, alcaline et corrosion par métal fondu. Le taux de corrosion est réduit de 70 % et le cycle de maintenance est prolongé de 30 %. Pour le moulage du verre (1 200 °C, verre fondu), la durée de vie de la résistance à la corrosion est augmentée de 50 % et la surface du moule ne présente aucune piqure visible. Résistance aux hautes températures : la dureté est maintenue entre HV900 et 1500 à 1400 °C et le taux de déformation est inférieur à 0,1 %, ce qui est idéal pour un moulage de précision. Dans les moules d'encapsulation de semi-conducteurs (1000 °C), la stabilité à haute température assure un fonctionnement continu jusqu'à 5000 fois.	Résistance aux hautes températures : absence de fluage entre 1 600 et 1 800 °C, résistance à la flexion maintenue entre 800 et 1 000 MPa, durée de vie de la matrice de 4 000 à 6 000 fois. En extrusion d'alliages à haute température (1 600 °C, 150 MPa), taux de déformation < 0,2 %, durée de vie jusqu'à 6 000 fois, supérieure à celle d'une matrice en molybdène ordinaire (3 000 fois). Résistance à la fatigue thermique : une conductivité thermique élevée (110–140 W/ m· K) réduit la fissuration thermique de 60 % et augmente la durée de vie en fatigue de 25 %. Dans les matrices de pressage isostatique à chaud (1 700 °C, chauffage cyclique), l'incidence de la fissuration thermique est réduite de 10 % à 3 %. Résistance aux chocs : ténacité K_{IC} de 15 à 20 MPa·m^{1/2} , taux de fissuration par impact réduit de 50 %. Lors de l'emboutissage à chaud d'aciers à très haute résistance pour automobiles (1 000 °C, 200 MPa), la matrice ne se fissure pas et sa durée de vie est multipliée par 5 000. Précision dimensionnelle : écart dimensionnel < 0,02 mm, déformation par dilatation thermique < 0,1 %, convient au moulage de grandes dimensions. Pour le moulage céramique

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

Résistance à la fatigue : Le revêtement à gradient réduit les contraintes thermiques, prolongeant la durée de vie en fatigue de 30 % et réduisant les fissures thermiques de 50 %. Dans le moulage sous pression d'alliages d'aluminium pour l'automobile (700 °C, charge cyclique), la durée de vie de l'outil est multipliée par 4 000 à 6 000.	(1 600 °C, zircone), le taux de qualification des produits finis a augmenté de 20 % (85 %→90 %).
Précision dimensionnelle : écart dimensionnel < 0,01 mm, déformation par dilatation thermique < 0,05 %, adapté au moulage de haute précision. Pour le moulage de verre optique (1 300 °C), le taux de qualification des produits finis a augmenté de 25 % (90 % → 95 %).	Efficacité de formage : La conductivité thermique élevée et la résistance au fluage réduisent les temps d'arrêt et augmentent l'efficacité de la production de 15 à 20 %. Dans l'extrusion de tubes en alliage de zirconium nucléaire (1 400 °C), la production par équipe est passée de 80 à 95 pièces.
Efficacité de formage : La dureté et la résistance à l'usure élevées réduisent la maintenance des moules et augmentent l'efficacité de production de 20 à 25 %. Lors du forgeage à chaud d'engrenages d'éoliennes (1 100 °C), la production par équipe est passée de 100 à 125 pièces.	Résistance à l'oxydation (revêtement requis) : Le revêtement MoSi ₂ résiste à l'oxydation et son taux d'oxydation est réduit de 80 % entre 600 et 1600 °C. Dans les fours à haute température (1700 °C), la durée de vie des moules revêtus est multipliée par 2000 à 4000.

- illustrer:
- Composition du matériau : Aperçu de la composition chimique du WC-Co et du TZM.
 - Propriétés des matériaux : comparez les paramètres clés tels que la dureté, la densité, le point de fusion, la résistance, etc.
 - Procédé de fabrication : résume les procédés de moulage, de frittage, de modification de surface, etc.
 - Avantages de performance : conservez des descriptions détaillées de la résistance à l'usure, de la résistance à la corrosion, de la résistance aux hautes températures, de la résistance à la fatigue, de la stabilité dimensionnelle, etc.
 - Domaines d'application et utilisations : couvre des utilisations spécifiques dans l'aérospatiale, l'énergie, l'automobile, l'électronique, la métallurgie et d'autres domaines, y compris les boîtiers.
 - Effet de moule à haute température : ajout de données quantitatives détaillées et de cas tels que la résistance à l'usure, la résistance à la corrosion, la résistance aux hautes températures, la résistance à la fatigue, la précision dimensionnelle et l'efficacité du moulage.

Comparaison et analyse des moules haute température en carbure cémenté et des moules en alliage titane-zirconium-molybdène (TZM)

Les moules en carbure haute température (WC-Co) et en alliage titane-zirconium-molybdène (TZM) ont démontré des avantages uniques dans le domaine du formage à haute température, répondant aux exigences strictes de nombreux secteurs tels que l'aérospatiale, l'énergie, l'automobile, l'électronique et la métallurgie. Les moules en WC-Co offrent d'excellentes performances de

formage de précision grâce à une dureté élevée (HV1000–1800) et une excellente résistance à l'usure (taux d'usure réduit de 50 à 70 %). Ils sont adaptés à des conditions de travail inférieures à 1400 °C, à une précision élevée (écart dimensionnel < 0,01 mm) et à une résistance à la corrosion. Leurs revêtements PVD/CVD (tels que TiAlN, Al₂O₃) et leur technologie de projection thermique à haute énergie (telle que APS/DGS) améliorent considérablement l'efficacité des moules haute température. Par exemple, la durée de vie des moules de forgeage à chaud en alliage de titane pour l'aviation à 1000 °C est de 8000 fois, ce qui est mieux que les moules traditionnels (4000 fois), et l'efficacité de la production est augmentée de 25 %.

Français Une excellente résistance à la corrosion (taux de corrosion réduit de 70 %) et à la fatigue (durée de vie en fatigue + 30 %) le rend excellent dans le moulage du verre (résistance à la corrosion du verre fondu, durée de vie + 50 %) et le moulage sous pression automobile (durée de vie augmentée de 4 000 à 6 000 fois). Cependant, les moules WC-Co ont une faible ténacité (K_{IC} 10–15 MPa·m^{1/2}), sont sujets à la fissuration sous un impact élevé, et une densité élevée (14–15 g/cm³) et des coûts de fabrication (50 000–500 000 yuans) limitent l'application de moules de grande taille.

Les moules en alliage TZM sont réputés pour leur résistance à très haute température (1 600 à 1 800 °C sans fluage) et leur résistance à la fatigue thermique (réduction de 60 % des fissures thermiques). Ils conviennent aux moules ultra-hautes températures et de grande taille (extrusion à haute température et pressage isostatique à chaud, par exemple). Leur conductivité thermique élevée (110 à 140 W/m·K) et leur ténacité (K_{IC} 15 à 20 MPa·m^{1/2}) résistent efficacement aux chocs thermiques et aux contraintes mécaniques. Par exemple, la durée de vie des moules d'extrusion en alliage haute température à 1 600 °C est multipliée par 6 000, et leur rendement est augmenté de 15 %. Le TZM a démontré d'excellents résultats de moulage à haute température pour l'extrusion de tubes en alliage de zirconium pour centrales nucléaires (rendement +15 %) et le formage de céramiques (taux de qualification +20 %). Le revêtement MoSi₂ améliore encore la résistance à l'oxydation (taux d'oxydation réduit de 80 %). Cependant, le TZM présente une faible dureté (HV 250–350), une résistance à l'usure insuffisante, nécessite un revêtement protecteur et s'oxyde facilement au-dessus de 600 °C, ce qui augmente les coûts. La rareté des ressources en molybdène (200 000 à 300 000 RMB la tonne) a également fait grimper le prix des moules.

entre les moules haute température en carbure cémenté et les moules en alliage titane-zirconium-molybdène (TZM)

Moules de précision et de petite taille (tels que les pièces forgées pour l'aviation, les moules en verre, le moulage sous pression pour l'automobile)

Les moules WC-Co sont supérieurs, avec une résistance à l'usure, une précision et une résistance à la corrosion exceptionnelles, ainsi qu'une longue durée de vie (5 000 à 8 000 fois).

Moules à très haute température et de grande taille (tels que l'extrusion à haute température, le pressage isostatique à chaud, le moulage en céramique)

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

Les moules TZM sont plus adaptés, avec une excellente résistance aux hautes températures et à la fatigue thermique, et conviennent aux formes complexes.

Équilibre entre coût et durée de vie

Les moules WC-Co sont adaptés aux utilisations à haute fréquence et présentent de faibles coûts de maintenance ; les moules TZM offrent une bonne aptitude à la transformation, mais nécessitent une protection antioxydante. À l'instar des exigences techniques des tuyères d'aviation (revêtements résistants à l'érosion à haute température), des électrodes de cellules électrolytiques (revêtements résistants à la corrosion) et des coupe-engrenages éoliens (revêtements résistants à l'usure), ces deux procédés reposent sur la modification de surface et l'ingénierie des interfaces (comme les revêtements à gradient et l'implantation ionique) pour optimiser les performances.

À l'avenir, grâce au développement du WC-Co nano-grainé, des revêtements composites multicouches, des procédés de frittage à basse température, ainsi que des revêtements antioxydants et de la technologie de fabrication additive de TZM, les moules à haute température amélioreront encore les performances et l'économie dans de nombreux domaines, offrant un soutien solide à une fabrication industrielle efficace et durable.

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 :

Présentation des composants des turbines à gaz en carbure cémenté

1. Contexte et importance des composants de turbines à gaz en carbure cémenté

Les turbines à gaz sont des équipements essentiels dans les secteurs de l'aérospatiale et de la production d'énergie. Leurs composants clés (aubes, tuyères, chambres de combustion et joints) doivent fonctionner de manière stable à haute température (1 000 à 1 600 °C), haute pression (10 à 30 MPa), vitesse de rotation élevée (10 000 à 50 000 tr/min) et environnements corrosifs. Les composants des turbines à gaz en carbure cémenté sont principalement constitués de carbure de tungstène (WC-Co). Grâce à sa dureté élevée, sa résistance à l'usure, à la température élevée et à la corrosion, ce matériau est devenu un choix idéal pour les revêtements résistants à l'usure et à la corrosion ou pour les composants soumis à de fortes charges dans les turbines à gaz. Ces composants prolongent la durée de vie des turbines à gaz (10 000 à 30 000 heures) et améliorent le rendement de combustion (jusqu'à 40 à 60 %) en améliorant la durabilité et le rendement.

L'application du carbure cémenté (WC-Co) dans les turbines à gaz se concentre principalement sur les revêtements de surface et les pièces spécifiques résistantes à l'usure, ce qui présente des points communs avec la technologie des matériaux utilisée dans les domaines des tuyères aéronautiques (résistance à l'érosion à haute température), des électrodes de cellules électrolytiques (résistance à la corrosion), des taillants d'engrenages éoliens (résistance à l'usure), etc. Les composants des turbines à gaz doivent résister à des conditions de fonctionnement extrêmes, telles que l'érosion par les gaz à haute température, l'oxydation, la fatigue et l'usure. Le carbure cémenté améliore donc considérablement les performances grâce à des procédés de fabrication avancés (tels que la technologie des revêtements, l'ingénierie des interfaces) et l'optimisation des matériaux (comme les nano-grains). Ces technologies répondent non seulement aux exigences de performance élevées des moteurs aéronautiques (tels que le GE9X), mais constituent également un soutien essentiel au développement durable de la production d'énergie et des turbines à gaz industrielles.

2. Propriétés matérielles des composants de turbines à gaz en carbure cémenté

Les composants de turbine à gaz en carbure cémenté sont généralement à base de WC-Co, avec une composition typique de WC 85–95 % en poids, Co 5–15 % en poids, et peuvent être dopés avec des additifs (tels que Cr_3C_2 , TiC) pour optimiser les performances. Ses principales caractéristiques sont les suivantes :

Dureté élevée

HV1000–1800, dépassant de loin les alliages à base de nickel (HV300–500), garantissant résistance à l'usure et intégrité de surface.

Stabilité à haute température

Le point de fusion du WC est de 2870 °C et la phase Co reste stable en dessous de 1400 °C. Les

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

revêtements (tels que Al_2O_3) améliorent encore la résistance à la température.

Résistance à l'usure

grâce à des nano-grains (taille des particules WC 0,2–1 μm) et des revêtements (tels que TiAlN), adaptés aux pointes de pales et aux gorges de buses.

Résistance à la corrosion

Résiste à l'oxydation, à la sulfuration et à la corrosion acide dans le gaz combustible (pH 2-5), réduit le taux de corrosion de 50 à 70 % et prolonge la durée de vie des composants.

Performance anti-fatigue

La teneur en Co (10–15 % en poids) assure la ténacité à la rupture (K_{IC} 10–15 $\text{MPa}\cdot\text{m}^{1/2}$) et la résistance à la fatigue thermique et aux chocs mécaniques.

Conductivité thermique

80–100 $\text{W}/\text{m}\cdot\text{K}$, ce qui favorise la dissipation de la chaleur et réduit le stress thermique.

Ces propriétés sont parfaitement conformes aux exigences des buses d'aviation (résistance à l'érosion), des électrodes de cellules électrolytiques (résistance à la corrosion) et des moules à haute température (résistance à l'usure), reflétant la supériorité du carbure cémenté dans les environnements extrêmes.

3. Processus de fabrication

La fabrication de composants de turbines à gaz en carbure cémenté exige l'uniformité microstructurale, la précision de surface ($R_a < 0,4 \mu\text{m}$) et la résistance d'adhérence du revêtement ($> 50 \text{ MPa}$). Les principaux procédés comprennent :

Préparation de poudre

De la poudre WC ultrafine (taille des particules 0,2–1 μm) et de la poudre Co de haute pureté ($> 99,9\%$) sont utilisées, mélangées par broyage à billes à haute énergie, et des additifs tels que Cr_3C_2 et VC sont ajoutés pour inhiber la croissance des grains.

Moulage et frittage

Les corps verts sont formés par pressage isostatique à froid (CIP, 100–400 MPa) ou moulage par compression, puis frittés en phase liquide dans un four de frittage sous vide ou à basse pression (1350–1450 $^{\circ}\text{C}$) pour obtenir une densité de 90–95 % et une granulométrie de 0,5–1 μm .

4. Modification de surface

Technologie de revêtement

par PVD (tel que TiAlN , TiCN , épaisseur 2–10 μm) ou CVD (tel que Al_2O_3 , épaisseur 5–20 μm), la dureté est augmentée à HV2000–3000 et la résistance à l'usure est améliorée de 30 à 50 %.

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

Projection thermique à haute énergie

La projection plasma (APS) ou la projection par détonation (DGS) forme un revêtement WC-Co ou Cr_3C_2 (50–500 μm), avec une force de liaison de 30–80 MPa et une résistance à l'érosion améliorée de 20–30 %.

Ingénierie des interfaces

Optimisez l'interface revêtement/substrat grâce à un revêtement en gradient ou une implantation ionique, améliorez l'adhérence de 30 % ($> 50\text{ N}$) et réduisez le pelage.

Usinage de précision

Le meulage au diamant, l'usinage CNC ou le micro-usinage laser sont utilisés pour garantir la précision géométrique des composants ($\pm 0,01\text{ mm}$) et la finition de surface ($\text{Ra } 0,2\text{--}0,4\text{ }\mu\text{m}$).

Ces procédés sont étroitement liés à la technologie de fabrication des buses d'aviation (nécessitant une géométrie complexe et des revêtements résistants à la corrosion) et des moules à haute température (nécessitant des revêtements résistants à l'usure), reflétant l'applicabilité interdomaine du traitement du carbure cimenté.

5. Avantages en termes de performances

Par rapport aux matériaux traditionnels (tels que les alliages à base de nickel et les céramiques), les composants de turbine à gaz en carbure cimenté présentent des avantages significatifs :

Haute résistance à l'usure

La dureté du revêtement est HV2000-3000, le taux d'usure est réduit de 50 à 70 % et la durée de vie des lames et des buses est prolongée de 30 à 50 % (10 000 $\rightarrow$ 15 000 heures).

Résistance aux hautes températures

La dureté reste à HV900-1500 à 1400°C et le taux de déformation est $< 0,1\%$, ce qui permet des températures de combustion plus élevées et améliore l'efficacité de 5 à 10%.

Résistance à la corrosion

Résistant à l'oxydation et à la corrosion des gaz, le taux de corrosion est réduit de 50 à 70 % et le cycle de maintenance est prolongé de 30 %, ce qui le rend adapté aux environnements gazeux difficiles.

Performance anti-fatigue

Les revêtements à gradient soulagent les contraintes thermiques, augmentent la durée de vie en fatigue de 30 %, réduisent les fissures thermiques de 50 % et améliorent la fiabilité des composants.

Stabilité dimensionnelle

Un faible coefficient de dilatation thermique ($5\text{--}7 \times 10^{-6} / ^\circ\text{C}$) et un écart dimensionnel $< 0,01\text{ mm}$

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

garantissent un fonctionnement de haute précision.

6. Scénarios d'application

Les composants de turbine à gaz en carbure cimenté sont principalement utilisés dans les scénarios suivants :

Revêtement de lame

WC-Co ou Cr_3C_2 sont utilisés sur les extrémités et les racines des aubes de turbine, augmentant la résistance à l'usure de 30 % et prolongeant la durée de vie de 40 %, ce qui les rend adaptés aux moteurs d'avion (tels que GE9X) et aux turbines à gaz industrielles.

Buse et guide

APS/DGS pulvérise un revêtement WC-Co sur le col de la buse et les aubes directrices, ce qui améliore la résistance à l'érosion de 20 % et augmente la durée de vie de 8 000 heures à 12 000 heures.

Revêtement de la chambre de combustion

CVD - Al_2O_3 protège la surface de la chambre de combustion, résiste à la corrosion à haute température, prolonge la durée de vie de 30 % et améliore l'efficacité de la combustion de 5 %.

Scellés

Les bagues d'étanchéité ou revêtements en carbure augmentent la résistance à l'usure de 50 %, réduisent les fuites de gaz et améliorent l'efficacité de 3 à 5 %.

Roulements et composants de support

Les pièces résistantes à l'usure WC-Co sont utilisées dans les roulements à haute température, réduisant le coefficient de frottement de 20 % (0,1–0,2) et prolongeant la durée de vie de 50 %.

Cas

Les aubes de turbine du moteur GE9X sont protégées par un revêtement PVD- TiAlN WC-Co, qui améliore la résistance à l'usure de 40 %, augmente la durée de vie de 10 000 heures à 14 000 heures et améliore l'efficacité de la combustion de 5 %.

Ces applications sont similaires aux exigences techniques des buses d'aviation (revêtements résistants à l'érosion), des électrodes de cellules électrolytiques (revêtements résistants à la corrosion) et des moules à haute température (revêtements résistants à l'usure), soulignant la polyvalence du carbure cimenté.

7. Défis et limites

Les composants des turbines à gaz en carbure cimenté sont confrontés aux défis suivants :

Coût de fabrication

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

Les équipements de revêtement (tels que PVD/CVD, 10 à 30 millions de RMB) et l'usinage de précision (rectification au diamant) sont coûteux.

Manque de ténacité

La ténacité à la rupture (K_{IC} 10–15 $\text{MPa}\cdot\text{m}^{1/2}$) est inférieure à celle des alliages à base de nickel (K_{IC} 50–100 $\text{MPa}\cdot\text{m}^{1/2}$), et il est facile de se fissurer sous un impact élevé.

Écaillage du revêtement

Sous des températures élevées et des contraintes élevées, la résistance de liaison du revêtement (30 à 50 MPa) peut être insuffisante et l'ingénierie de l'interface doit être optimisée.

Limite de poids

Une densité élevée (14–15 g/cm^3) augmente le poids des pièces rotatives, ce qui affecte l'efficacité et nécessite le développement de revêtements légers.

Impact environnemental

Les procédés de frittage et de revêtement sont gourmands en énergie (500 à 1 000 kWh/lot) et la rareté des ressources en cobalt (les réserves mondiales sont d'environ 7 millions de tonnes) augmente les coûts.

8. Tendances de développement futures

Afin de relever les défis et de favoriser le développement des composants de turbines à gaz en carbure cimenté, les orientations suivantes peuvent être privilégiées à l'avenir :

Carbure cimenté nano-grainé

Développer un WC ultrafin (taille des particules $< 0,2 \mu\text{m}$), augmenter la dureté à HV1800–2000 et augmenter la ténacité de 20 %, ce qui le rend adapté aux composants à forte charge.

Revêtement composite multicouche

Le revêtement multicouche PVD/CVD (tel que TiAlN / Al_2O_3 / CrN) peut améliorer la résistance à l'usure de 50 %, l'adhérence de 30 % et prolonger la durée de vie.

Fabrication verte

Optimiser le frittage à basse température ($< 1300^\circ\text{C}$) et le carbure cimenté à faible teneur en cobalt/sans cobalt pour réduire la consommation d'énergie de 30 à 50 % et alléger la pression sur les ressources en cobalt.

Fabrication additive

La fabrication de revêtements ou de composants complexes par impression 3D (comme le frittage sélectif par laser SLS) peut réduire les coûts de traitement de 20 à 30 %.

Optimisation intelligente

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

En utilisant l'IA et la simulation thermodynamique pour optimiser la conception du revêtement et la structure de l'interface, l'efficacité a augmenté de 20 % et la précision de la prédiction de la durée de vie a augmenté de 30 %.

9. Tableau récapitulatif

Caractéristiques principales et points techniques des composants de turbine à gaz en carbure cimenté

projet	décrire
Composition du matériau	WC 85–95 % en poids , Co 5–15 % en poids , Cr ₃ C ₂ en option , Additifs TiC
Caractéristiques principales	Dureté HV1000–1800, résistance à la flexion 2000–2500 MPa, résistance à la température 1400°C, forte résistance à l'usure
Processus de fabrication	Préparation de poudre → pressage isostatique à froid → frittage sous vide → revêtement (PVD/CVD, APS/DGS) → usinage de précision (rectification au diamant, laser)
Modification de surface	PVD - TiAlN : Dureté HV2000–3000, résistance à l'usure +30% CVD-Al ₂ O ₃ : Résistance à la température 1400°C, durée de vie +40% APS/DGS-WC-Co : Force de liaison 30–80 MPa, résistance à l'érosion +20–30 %
Scénario d'application	Revêtements de pales, buses, chemises de chambre de combustion, joints, composants de roulements
Avantages en termes de performances	Résistance à l'usure +30–50 %, durée de vie 10 000–15 000 heures, efficacité +5–10 %, précision ±0,01 mm
défi	Coût élevé (5 000 à 50 000 RMB/pièce), ténacité insuffisante, écaillage du revêtement, poids élevé, impact environnemental
Orientations futures	Particules nanocristallines, revêtements multicouches, fabrication verte, impression 3D, optimisation intelligente

illustrer:

Matériaux et propriétés : Basé sur la composition et les propriétés typiques du WC-Co.

Procédé de fabrication : Résume l'ensemble du processus de moulage, de frittage, de modification et de traitement.

Performances et défis : quantifier les avantages (par exemple, durée de vie, efficacité) et les limites (par exemple, coût, robustesse).

10. Conclusion

Les composants en carbure de tungstène pour turbines à gaz sont devenus des composants essentiels des moteurs d'avion et des turbines à gaz industrielles grâce à leur dureté élevée, leur résistance à l'usure, aux hautes températures et à la corrosion. Ils atteignent d'excellentes performances grâce à des technologies de revêtement avancées (telles que PVD/CVD, APS/DGS) et à l'ingénierie des interfaces. Les revêtements WC-Co améliorent considérablement la durée de vie (10 000 à 15 000 heures) et le rendement (+5 à 10 %) de composants tels que les aubes et les tuyères, et répondent parfaitement aux exigences techniques des tuyères aéronautiques (résistance à l'érosion), des électrodes de cellules électrolytiques (résistance à la corrosion) et des moules haute température (résistance à l'usure). Malgré des coûts élevés, une robustesse insuffisante et des défis

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

environnementaux, les progrès des matériaux nanocristallins, des revêtements composites multicouches et de la fabrication verte permettront aux composants en carbure cémenté d'atteindre des performances et une durabilité accrues, offrant des solutions fiables et performantes pour les systèmes d'alimentation des secteurs de l'aérospatiale et de l'énergie.

Annexe :

Outils de transformation des aliments en carbure et pièces d'équipement de transformation des aliments

sont fabriqués à partir de carbure cimenté à base de carbure de tungstène (WC) (WC 8894 % en poids, Co/Ni 612 % en poids). Grâce à une rectification de précision et à un revêtement PVD de qualité alimentaire (tel que CrN, DLC, 24 μm), ils atteignent une dureté élevée (1800-2000 HV), une résistance à l'usure (volume d'usure < 0,04 mm^3/h , ASTM G65), une résistance à la corrosion (< 0,01 mm/an, pH 410) et une sécurité alimentaire (conforme aux normes FDA 21 CFR 175.300, GB 4806.12016). Les couteaux sont conçus pour la transformation des aliments (viande, fruits et légumes, surgelés, pâte), adaptés au tranchage, au découpage en dés, au hachage et à l'épluchage, avec une vitesse de coupe de 50 à 300 m/min, une durée de vie de 1 000 à 3 000 minutes et une rugosité de surface de Ra 0,1 à 0,4 μm ; les composants de l'équipement (tels que les moules, les guides, les buses) sont utilisés pour le formage, le transport et la pulvérisation des aliments, avec une durée de vie de 6 à 12 mois. Basé sur les normes nationales (GB/T 7997-2017, GB 4806-12016) et les besoins de l'industrie alimentaire, cet article explique le processus de fabrication, les performances, l'application et l'orientation d'optimisation des couteaux et des composants.

1.1 Outils de transformation des aliments en carbure

Les outils et composants d'équipements de transformation alimentaire en carbure cimenté utilisent une matrice WC à grain ultra-fin (0,2 à 0,5 μm), une phase de liaison à base de nickel (résistance à la corrosion) et un revêtement PVD de qualité alimentaire (CrN, DLC, ZrN). Grâce à une rectification de haute précision (rayon d'arête < 5 μm) ou un polissage (Ra < 0,1 μm), ils répondent aux exigences élevées d'hygiène, de résistance à l'usure, de résistance à la corrosion et de sécurité de la transformation alimentaire.

Caractéristiques des outils de transformation des aliments en carbure cimenté

fois mieux que l'acier inoxydable (400-600 HV).

Résistance à la corrosion : Résistant aux acides et aux alcalis (pH 410, < 0,01 mm/an), conforme à la sécurité du contact alimentaire (FDA, GB 4806.1).

Faible frottement : Le revêtement a un coefficient de frottement de < 0,2, est antiadhésif et facile à nettoyer.

Résistance à l'usure : usure < 0,04 mm^3/h , durée de vie de l'outil 1000-3000 minutes, durée de vie des composants 6-12 mois.

Application : Les couteaux sont utilisés pour trancher la viande, couper les fruits et légumes en dés, couper les aliments surgelés et diviser la pâte; les pièces sont utilisées pour les grilles de hachoir à viande, les rouleaux convoyeurs et les lames de mélangeur.

1.2 Types d'outils de transformation des aliments en carbure

Couteau:

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

Couteau à trancher : coupe en tranches fines (viandes, fruits et légumes), vitesse 100300 m/min.

Couteau à dés : coupe en cubes (légumes, viandes cuites), vitesse 80200 m/min.

Hachoir à viande : hache la viande , vitesse 50150 m/min.

Couteau à éplucher : épluchage de fruits et légumes, vitesse 100250 m/min.

Pièces d'équipement :

Plaque de tamisage : Tamis de hachoir à viande (ouverture 310 mm), résistant à l'usure et à la corrosion.

Rouleaux de transport : transport des aliments, anti-adhérence.

Lame de mélange : mélange de pâte/sauce, résistante à l'usure et à la corrosion.

1.3 Avantages des outils de transformation des aliments en carbure

fois plus élevé que l'acier inoxydable et l'efficacité est augmentée de 30 à 50 %.

Durée de vie : outils 1000-3000 minutes, pièces 6-12 mois (acier inoxydable 13 mois).

Hygiène : Ra 0,10,4 μ m , faible adhérence, nombre de colonies < 10 UFC/ cm² .

Sécurité : Revêtement de qualité alimentaire, non toxique et non migrant (GB 4806.12016, FDA).

2.1 Ingrédients

Matrice des matériaux :

WC : 8894 % en poids , grain ultrafin (D50 0,20,5 μ m) , dureté 1800-2000 HV.

Ni : 612 % en poids , résistant à la corrosion (H₂SO₄, NaCl < 0,01 mm/an), qualité alimentaire.

Additif : Cr₃C₂ (0,20,5 % en poids), inhibe la croissance des grains et augmente la dureté de 5 %.

Revêtement :

CrN (PVD) : dureté 18002200 HV, coefficient de frottement 0,2, résistant à la corrosion, conforme FDA.

DLC (PVD) : dureté 30003500 HV, coefficient de frottement <0,1, anti-adhérence, qualité alimentaire.

ZrN (PVD) : dureté 20002500 HV, excellente résistance aux acides, convient aux aliments acides (pH 46).

2.2 Structure du gradient

Surface : faible teneur en Ni (68 % en poids), WC à grains ultrafins (0,2-0,5 μ m) , dureté 1800-2000 HV.

Noyau : Haute teneur en Ni (1012 % en poids), WC à grains fins (0,51 μ m) , KIC 1012 MPa·m^{1/2} .

Avantages : Résistance à l'usure augmentée de 20 %, résistance aux chocs augmentée de 15 %, probabilité de fissure réduite de 15 %.

Préparation : Pressage en couches + frittage HIP (1350°C, 120 MPa).

2.3 Exigences de performance

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

Dureté : 18002000 HV (GB/T 79972017).
Résistance à la flexion : 1,82,5 GPa (GB/T 38512015).
Ténacité à la rupture : $1012 \text{ MPa} \cdot \text{m}^{1/2}$.
Résistance à l'usure : Taux d'usure $< 0,04 \text{ mm}^3 / \text{h}$ (ASTM G65).
Résistance à la corrosion : pH 410, $< 0,01 \text{ mm/an}$ (GB 96842011).
Sécurité alimentaire : non toxique, pas de migration (GB 4806.12016, FDA 21 CFR 175.300).

Processus de fabrication

3.1 Préparation de la poudre

Matières premières : WC (D50 0,20,5 μm , pureté $>99,9\%$), Ni (D50 12 μm), Cr₃C₂ (D50 0,51 μm).

Broyage à boulets : broyeur à boulets planétaire (billes de ZrO₂, 10:1), 300 tr/min, 1620 heures, écart granulométrique $\leq \pm 0,1 \mu\text{m}$, uniformité $>95\%$.

3.2 Formation

Méthode : Pressage isostatique à froid (CIP) ou moulage par compression.

Paramètres : 250280 MPa, pression de maintien 60 secondes, moule en acier (écart $\leq \pm 0,05 \text{ mm}$), densité de la billette 8,710,0 g/cm³.

Résultats : Écart dimensionnel $\leq \pm 0,1 \text{ mm}$, taux de fissures $<1\%$.

3.3 Frittage

Méthode : Frittage sous vide + HIP.

paramètre:

Déparaffinage : 200-600°C, 3°C/min, atmosphère H₂ (O₂ $<5 \text{ ppm}$), 10^{-2} Pa .

Frittage : 1350/1400°C, 10^{-4} à 10^{-5} Pa , 22,5 h.

HIP : 1350°C, 120 MPa (Ar), 11,5 heures.

Résultats : Densité 14,815,0 g/cm³, porosité $< 0,001\%$, dureté 18002000 HV.

3.4 Usinage de précision

Rectification : rectifieuse CNC, meule diamantée (35 μm), 3000 tr/min, avance 0,010,03 mm/passe, rayon de coupe $< 5 \mu\text{m}$, Ra 0,10,2 μm (outil); rectification de surface, Ra $< 0,2 \mu\text{m}$ (composant).

Polissage : Pâte à polir diamantée (12 μm), 800 tr/min, Ra $< 0,1 \mu\text{m}$, anti-adhérence augmentée de 20 %.

3.5 Revêtement

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

Méthode : PVD (cible Cr/Zr, >99,99%).

Paramètres : CrN /DLC/ ZrN (24 μm), 10^{-4} Pa, 250300°C, polarisation 80 V, taux de dépôt 0,81 $\mu\text{m}/\text{h}$.

Résultats : Adhérence > 80 N, coefficient de frottement < 0,2, résistance à la corrosion augmentée de 30 %.

3.6 Détection

Microstructure : MEB (grain 0,20,5 μm), XPS (écart $\leq \pm 0,1$ % en poids).

Performances : Écart de dureté $\leq \pm 50$ HV (ISO 6508), taux d'usure < 0,04 mm^3/h (ASTM G65), résistance à la corrosion (pH 410, < 0,01 mm/an).

Hygiène : test microbiologique (nombre de colonies < 10 UFC/ cm^2 , GB 4789.2), test de migration (< 0,1 mg/kg , GB 31604.8).

Géométrie : CMM, écart bord/surface $\leq \pm 0,005$ mm.

Scénario d'application

Les outils et composants d'équipement de transformation des aliments en carbure fournissent les conditions de travail, les paramètres de processus, les données de test et les suggestions de sélection suivants pour la viande, les fruits et légumes, les aliments surgelés, le traitement de la pâte et les exigences de résistance à l'usure des équipements :

4.1 Outils

Morceaux de viande (porc congelé, 18°C) :

Conditions de travail : Porc congelé (HB ~150, contenant de la matière grasse), épaisseur de tranche 2 mm.

Type : Couteau à trancher à disque ($\varnothing$ 300 mm, simple tranchant).

Matrice : WC8%Ni (grain ultrafin, D50 0,20,5 μm , Cr3C2 0,5 % en poids), dureté 1800-2000 HV.

Revêtement : PVD DLC (3 μm , dureté 3500 HV, frottement 0,1).

Géométrie : angle de coupe 20°, rayon de coupe 0,01 mm, tranchant poli ($R_a < 0,1$ μm).

Procédé : broyage à billes pendant 18 heures, CIP 280 MPa, frittage 1400°C (10^{-5} Pa, 2,5 heures), HIP 1350°C (120 MPa, 1,5 heure), meulage (R_a 0,1 μm), PVD DLC (250°C, adhérence > 80 N).

Paramètres : vitesse 200 m/min, avance 0,05 mm/r, coupe à sec.

test:

Durée de vie : 2000 minutes (400 minutes pour l'acier inoxydable, 5 fois plus longtemps).

Surface : R_a 0,2 μm , coupe lisse, pas de déchirure.

Force de coupe : 200 N (300 N pour l'acier inoxydable, réduction de 33%).

Perte par usure : VB < 0,1 mm, < 0,03 mm^3/h .

Hygiène : Nombre de colonies < 10 UFC/ cm^2 , pas d'adhérence.

Modèle : WCNi+ DLC, trancheuse $\varnothing$ 300 mm, coupe à sec + désinfection régulière.

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

Fruits et légumes coupés en dés (carottes, HB 50) :

Conditions de travail : Carottes (90% d'humidité, contenant des fibres), coupées en dés de 10×10 mm.

Type : Couteau à dés (carré, 50×50 mm, 4 tranchants) .

Matrice : WC10%Ni (grain ultrafin, D50 0,20,5 μ m , Cr3C2 0,5 % en poids), dureté 1800-2000 HV.

Revêtement : PVD CrN (3 μ m , dureté 2200 HV, frottement 0,2).

Géométrie : angle de coupe 25°, rayon de coupe 0,02 mm, tranchant poli (Ra <0,1 μ m) .

Procédé : broyage à billes pendant 18 heures, CIP 280 MPa, frittage 1400°C (10⁻⁵ Pa, 2 heures), HIP 1350°C (120 MPa, 1,5 heure), meulage (Ra 0,1 μ m) , PVD CrN (300°C, adhérence >80 N).

Paramètres : vitesse 150 m/min, avance 0,1 mm/r, coupe humide (eau, 5 L/min).

test:

Durée de vie : 1800 minutes (500 minutes pour l'acier inoxydable, soit 3,6 fois plus longtemps) .

Surface : Ra 0,3 μ m , coupe nette, pas d'étirement des fibres.

Force de coupe : 150 N (250 N pour l'acier inoxydable, réduction de 40 %).

Perte par usure : VB < 0,12 mm, < 0,04 mm³ / h.

Hygiène : Quantité de migration < 0,1 mg/kg, pas de corrosion.

Sélection : WCNi+ CrN , couteau à découper 50×50 mm, coupe humide + nettoyage haute fréquence.

Viande hachée (bœuf, avec gras) :

Conditions de travail : Bœuf (20% matière grasse, 70% humidité), haché Ø 5 mm.

Type : Hachoir à viande (Ø 100 mm, 4 bords) .

Matrice : WC12%Ni (grain ultrafin, D50 0,20,5 μ m , Cr3C2 0,5 % en poids), dureté 1800-2000 HV.

Revêtement : PVD ZrN (3 μ m , dureté 2500 HV, frottement 0,15).

Géométrie : angle de coupe 30°, rayon de coupe 0,03 mm, surface polie (Ra <0,1 μ m) .

Procédé : broyage à billes pendant 20 heures, CIP 280 MPa, frittage 1400°C (10⁻⁵ Pa, 2,5 heures), HIP 1350°C (120 MPa, 1,5 heure), meulage (Ra 0,1 μ m) , PVD ZrN (300°C, adhérence >80 N).

Paramètres : vitesse 100 m/min, avance 0,15 mm/r, coupe à sec.

test:

Durée de vie : 1500 minutes (300 minutes pour l'inox, 5 fois plus longtemps) .

Surface : Ra 0,3 μ m , particules uniformes.

Force de coupe : 250 N (400 N pour l'acier inoxydable, réduction de 37%).

Perte par usure : VB < 0,15 mm, < 0,04 mm³ / h.

Hygiène : Pas d'adhérence de graisse, nombre de colonies < 10 UFC/ cm² .

Modèle : WCNi+ ZrN , hachoir à viande Ø 100 mm, coupe à sec + stérilisation basse température.

Épluchage des fruits et légumes (pommes de terre, 80% d'eau) :

Conditions de travail : pommes de terre (contenant de l'amidon, 80% d'humidité), épaisseur de pelage 1 mm.

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

Type : Couteau à dépecer (courbé, 100×20 mm).
Matrice : WC8%Ni (grain ultrafin, D50 0,20,5 μ m , Cr3C2 0,5 % en poids), dureté 1800-2000 HV.
Revêtement : PVD CrN (2 μ m , dureté 2200 HV, frottement 0,2).
Géométrie : angle de coupe 15°, rayon de coupe 0,01 mm, tranchant poli (Ra <0,1 μ m) .
Procédé : broyage à billes pendant 18 heures, CIP 280 MPa, frittage 1400°C (10⁻⁵ Pa, 2 heures), HIP 1350°C (120 MPa, 1,5 heure), meulage (Ra 0,1 μ m) , PVD CrN (300°C, adhérence >80 N).
Paramètres : vitesse 200 m/min, avance 0,08 mm/r, coupe humide (eau, 5 L/min).
test:
Durée de vie : 2500 minutes (600 minutes pour l'acier inoxydable, soit 4,2 fois plus longtemps) .
Surface : Ra 0,2 μ m , pelage uniforme, aucun résidu.
Force de coupe : 100 N (200 N pour l'acier inoxydable, réduction de 50 %).
Taux d'usure : VB < 0,1 mm, < 0,03 mm³ / h.
Hygiène : Pas d'adhérence d'amidon, quantité de migration < 0,1 mg/kg.
Sélection : WCNi+ CrN , couteau à dénuder 100×20 mm, coupe humide + nettoyage régulier.

4.2 Composants de l'équipement

Tamis pour hachoir à viande (bœuf, avec graisse) :

Conditions de travail : viande de bœuf (20% de matière grasse, 70% d'humidité), diamètre du trou Ø 5 mm, hachage en continu.

Type : Plaque tamisante (Ø 150 mm, épaisseur 10 mm, taille des pores Ø 5 mm).
Matrice : WC12%Ni (grain ultrafin, D50 0,20,5 μ m , Cr3C2 0,5 % en poids), dureté 1800-2000 HV.
Revêtement : PVD CrN (3 μ m , dureté 2200 HV, frottement 0,2).
Géométrie : Écart d'ouverture <±0,05 mm, surface polie (Ra <0,1 μ m) .
Procédé : broyage à billes pendant 20 heures, CIP 280 MPa, frittage 1400°C (10⁻⁵ Pa, 2,5 heures), HIP 1350°C (120 MPa, 1,5 heure), rectification de surface (Ra 0,1 μ m) , PVD CrN (300°C, adhérence >80 N).
Paramètres : Fonctionnement continu, contact avec le bœuf (pH 5,5-6,5), environnement humide (lavage à l'eau, 5 L/min).
test:
Durée de vie : 12 mois (3 mois pour l'inox, 4 fois plus longtemps).
Surface : Ra 0,2 μ m , pas de colmatage.
Taux d'usure : < 0,04 mm³/h, pas de corrosion.
Hygiène : Nombre de colonies < 10 UFC/cm² , quantité de migration < 0,1 mg/kg.
Modèle : WCNi+ CrN , plaque tamisante Ø 150 mm, nettoyage humide + désinfection régulière.

Rouleaux de transport (fruits et légumes, 90 % d'humidité) :

Conditions de travail : Fruits et légumes (90% d'eau, contenant du jus acide, pH 46), transmission continue.

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

:

Type : Rouleau transporteur (Ø 100 mm, longueur 500 mm).
Matrice : WC10%Ni (grain ultrafin, D50 0,20,5 µ m , Cr3C2 0,5 % en poids), dureté 1800-2000 HV.
Revêtement : PVD DLC (3 µ m , dureté 3500 HV, frottement 0,1).
Géométrie : Surface polie (Ra < 0,1 µ m) , écart de circularité < ± 0,01 mm.
Procédé : broyage à billes pendant 18 heures, CIP 280 MPa, frittage 1400°C (10⁻⁵ Pa, 2 heures), HIP 1350°C (120 MPa, 1,5 heure), meulage (Ra 0,1 µ m) , PVD DLC (250°C, adhérence >80 N).
Paramètres : vitesse de rotation 60 tr/min, contact avec jus de fruits et légumes (pH 46), environnement humide.
test:
Durée de vie : 10 mois (2 mois pour l'inox, 5 fois plus longtemps).
Surface : Ra 0,1 µ m , aucune adhérence.
Taux d'usure : < 0,03 mm³/h, pas de corrosion.
Hygiène : Nombre de colonies < 10 UFC/cm² , quantité de migration < 0,1 mg/kg.
Modèle : WCNi+ DLC , rouleau convoyeur Ø 100 mm, nettoyage humide + inspection régulière.

Lame de mélange (pâte, avec sel) :

Conditions de travail : pâte (2% sel, 40% eau), pétrissage continu.
:
Type : Lame de mélange (200×50 mm, épaisseur 5 mm).
Matrice : WC8%Ni (grain ultrafin, D50 0,20,5 µ m , Cr3C2 0,5 % en poids), dureté 1800-2000 HV.
Revêtement : PVD ZrN (3 µ m , dureté 2500 HV, frottement 0,15).
Géométrie : Surface polie (Ra <0,1 µ m) , rayon d'arête 0,5 mm.
Traitement : broyage à billes pendant 18 heures, CIP 280 MPa, frittage 1400°C (10⁻⁵ Pa, 2 heures), HIP 1350°C (120 MPa, 1,5 heure), meulage (Ra 0,1 µ m) , PVD ZrN (300°C, adhérence >80 N).
Paramètres : vitesse 30 tr/min, pâte de contact (pH 56), environnement humide.
test:
Durée de vie : 8 mois (2 mois pour l'inox, 4 fois plus longtemps).
Surface : Ra 0,2 µ m , aucune adhérence.
Taux d'usure : < 0,04 mm³/h, pas de corrosion.
Hygiène : Nombre de colonies < 10 UFC/cm² , quantité de migration < 0,1 mg/kg.
Sélection : WCNi+ ZrN , lames 200×50 mm, nettoyage humide + désinfection régulière.

Analyse des performances

paramètre	Outils/pièces en carbure	en Couteaux/pièces en acier inoxydable
Dureté (HV)	18002000	400600
Résistance à la flexion (GPa)	1,82,5	1.52.0
Ténacité (KIC, MPa·m ^{1 / 2})	1012	50100
Résistance à l'usure (mm³/h)	<0,04	0.10.3

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

paramètre	Outils/pièces en carbure	Couteaux/pièces en acier inoxydable
Résistance à la corrosion (mm/an, pH 410)	<0,01	0,050,1
Vitesse de coupe (m/min, outil)	50300	20100
Vie (minutes, outil)	10003000	200600
Durée de vie (mois , pièces)	612	13
Ra (μm)	0.10.4	0,51,0

Points forts:

Résistance à l'usure : Grain ultrafin WC+DLC/ CrN / ZrN , usure < 0,04 mm³ / h, durée de vie augmentée de 35 fois (outils), 45 fois (composants).

Résistance à la corrosion : Base Ni + CrN / ZrN , pH 410, <0,01 mm/an.

Efficacité : Vitesse de l'outil 50300 m/min, efficacité augmentée de 3050 %.

Hygiène : Ra 0,10,4 μm , colonie <10 UFC/ cm² , conformément à GB 4806.1.

Suggestions d'optimisation

Optimisation des matériaux :

Couteaux à viande/plaques tamis : WCNi (8 % en poids) + DLC (3 μm) , anti-adhérence augmentée de 30 %.

Couteaux/rouleaux de transport pour fruits et légumes : WCNi (10 % en poids) + CrN (3 μm) , résistance à la corrosion augmentée de 25 %.

Hachoir à viande/lame de mélange : WCNi (12 % en poids) + ZrN (3 μm) , résistance aux chocs augmentée de 15 %.

Additif : Cr3C2 0,5 % en poids , dureté augmentée de 5 %.

Optimisation des processus :

Frittage : HIP 1350°C, 120 MPa, porosité <0,001%, résistance à l'usure augmentée de 15%.

Rectification : Rectifieuse CNC, meule diamantée (35 μm) , rayon de coupe < 5 μm (outil), Ra < 0,1 μm (composant).

revêtement:

DLC (3 μm , 250°C, polarisation 80 V), réduction de frottement 50%.

CrN (3 μm , 300°C, polarisation 80 V), résistance à la corrosion augmentée de 30%.

ZrN (3 μm , 300°C, polarisation 80 V), anti-frottement augmenté de 20%.

Polissage : Ra < 0,1 μm , réduisant l'adhérence de 20 %.

Optimisation des équipements :

Four de frittage : contrôle de température $\pm 3^\circ\text{C}$, 10^{-5} Pa.

Rectifieuse CNC : écart de tranchant/surface < $\pm 0,005$ mm.

Equipement de revêtement : taux de dépôt 0,81 μm /h, écart < $\pm 0,1$ μm .

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

Adaptation des conditions de travail :

Plaque de tranchage/cribleage de la viande : WCNi+ DLC , vitesse 150300 m/min (couteau), coupe à sec/nettoyage humide.

Rouleau de découpe/convoyage de fruits et légumes : WCNi+ CrN , vitesse 100200 m/min (outil), découpe/nettoyage humide.

Lame de hachage/mélange : WCNi+ ZrN , vitesse 50150 m/min (outil), coupe à sec/nettoyage humide.

Décollage : WCNi+ CrN , vitesse 150250 m/min, découpe humide.

Tests et vérifications :

Microstructure : MEB (grain 0,20,5 μ m) , EBSD (contrainte aux joints de grains < 5 %).

Performances : ASTM G65 (<0,030,04 mm³/h), résistance à la corrosion (pH 410, <0,01 mm/an).

Hygiène : Nombre de colonies < 10 UFC/cm² (GB 4789.2), quantité de migration < 0,1 mg/kg (GB 31604.8).

Test : Force de coupe de l'outil 100250 N, durée de vie 15002500 minutes, Ra 0,20,3 μ m ; durée de vie du composant 812 mois, Ra 0,10,2 μ m .

Normes et spécifications

GB/T 183762014 : Porosité < 0,01 %.

GB/T 38502015 : Écart de densité $\leq \pm 0,1$ g/ cm³ .

GB/T 38512015 : Résistance 1,82,5 GPa .

GB/T 79972017 : Dureté 1800 - 2000 HV.

GB 4806.12016 : Sécurité alimentaire, non toxique et non migrant.

GB 96842011 : Résistance à la corrosion, pH 410, < 0,01 mm/an.

ASTM G65 : Taux d'usure < 0,04 mm³ / h.

ISO 6508 : Écart de dureté $\leq \pm 50$ HV.

FDA 21 CFR 175.300 : Sécurité du contact alimentaire.

en conclusion

Les outils et composants d'équipements de transformation des aliments en carbure cémenté atteignent une dureté élevée (18002000 HV) , résistance à l'usure (< 0,04 mm³ / h) , résistance à la corrosion (pH 410, <0,01 mm/ an) et la sécurité alimentaire (GB 4806.12016) en optimisant les matériaux (WC à grain ultrafin 0,20,5 μ m , Ni 612 % en poids , revêtement CrN /DLC/ ZrN) et les procédés (frittage HIP 1350° C, 120 MPa, revêtement PVD 250-300°C). Les couteaux sont adaptés au tranchage de la viande, au découpage en dés des fruits et légumes, au hachage et à l'épluchage, avec une vitesse de 50 à 300 m/min, une augmentation de l'efficacité de 30 à 50 % , une durée de vie de 1500 à 2500 minutes et un Ra 0,2-0,3 μ m ; les pièces conviennent aux tamis de hachoir à viande, aux rouleaux de convoyeur et aux lames de mélange, avec une durée de vie de 8 à 12 mois, Ra 0,1-0,2 μ m et une colonie de <10 UFC/cm² . L'optimisation des grains ultrafins, des revêtements de qualité alimentaire et des processus de polissage peut réduire les coûts (200 à 1 000 yuans par outil et 500 à 2 000 yuans par pièce), mais le défi réside dans le meulage de haute précision (augmentation des coûts de 15 %) et la certification de l'hygiène des revêtements.

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

CTIA GROUP utilise le nano WC (D50 0,20,5 μm) , le frittage HIP (porosité $< 0,001\%$) et le revêtement PVD alimentaire pour développer des outils (couteaux à trancher, hachoirs à viande) et des composants (tamis, rouleaux de transport) hautes performances répondant aux besoins de l'industrie agroalimentaire (durée de vie des outils > 2000 minutes, durée de vie des composants > 10 mois, $R_a < 0,2\ \mu\text{m}$) . Les produits sont vérifiés par MEB, ASTM G65 et GB 4806.

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 :

Buse de turbine à gaz en carbure

La buse de turbine à gaz en carbure cimenté est fabriquée à partir de carbure de tungstène (WC) (WC 8894 % en poids, Ni 612 % en poids). Grâce à une rectification de précision, un polissage et un revêtement PVD résistant à la corrosion à haute température (tel que CrN, AlCrN, TiAlN, 25 μm), il atteint une dureté élevée (1800-2200 HV), une résistance à l'usure (volume d'usure $<0,03 \text{ mm}^3/\text{h}$, ASTM G65), une résistance aux hautes températures ($>1200^\circ\text{C}$, résistance à l'oxydation), une résistance à la corrosion ($<0,01 \text{ mm/an}$, pH 12, gaz contenant du soufre) et une résistance à la fatigue thermique ($>10^5$ cycles). La buse est utilisée dans la chambre de combustion d'une turbine à gaz pour guider le gaz à haute température et haute pression (1400 - 1600 $^\circ\text{C}$, 1020 MPa) vers les aubes de turbine. Il doit résister aux chocs thermiques extrêmes, à la corrosion et à l'érosion, avec une durée de vie de 8000 à 20000 heures et une rugosité de surface de Ra 0,10,3 μm . Sur la base des conditions de fonctionnement de la turbine à gaz (GE Frame 59, Siemens série SGT) et des normes industrielles (ASME PTC 22, ISO 2314), cet article décrit la buse, le processus de fabrication, les performances, l'application et la direction d'optimisation.

Présentation des buses de turbine à gaz en carbure cimenté

1.1 Définition et caractéristiques de la buse de turbine à gaz en carbure cimenté

La buse de turbine à gaz en carbure cimenté adopte une matrice WC à grains ultrafins (0,20,5 μm), une phase de liaison à base de Ni (résistance à la corrosion) et un revêtement PVD haute température (CrN, AlCrN, TiAlN), par meulage de précision (écart géométrique $\pm 0,01 \text{ mm}$) ou polissage (Ra $<0,1 \mu\text{m}$), il répond aux exigences de haute température, haute pression, corrosion et érosion des turbines à gaz et guide le gaz de combustion vers les aubes de turbine. Caractéristiques :

Dureté élevée : 1800 - 2200 HV, la résistance à l'usure est 23 fois meilleure que les alliages à base de nickel (800 - 1200 HV).

Résistance aux hautes températures : Le revêtement est résistant à l'oxydation ($>1200^\circ\text{C}$) et le substrat est résistant aux chocs thermiques ($\Delta T 1000^\circ\text{C}$, $>10^5$ fois).

Résistance à la corrosion : Résistant aux gaz contenant du soufre, aux acides et aux alcalis (pH 12, $<0,01 \text{ mm/an}$), conformément aux exigences de résistance à la corrosion de l'ASME.

Faible frottement : le coefficient de frottement du revêtement est $<0,15$, ce qui réduit l'érosion et le dépôt de carbone.

Résistance à l'usure : perte par usure $<0,03 \text{ mm}^3/\text{h}$, durée de vie 8 000 - 20 000 heures.

Application : aubes directrices de tuyères de turbine à gaz (GE Frame 59, série Siemens SGT), tuyères de chambre de combustion.

1.2 Types de buses de turbine à gaz en carbure

Tuyère à géométrie fixe : turboréacteur simple, type convergent, vitesse 0,81,2 Ma.

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

Tuyère convergente-divergente (CD) : turboréacteur à double flux, supersonique (1,5-2,5 Ma), à géométrie variable.

Buse de canal de refroidissement : avec trous de refroidissement internes ($\varnothing$ 0,52 mm), résistante à la température de 1400 à 1600°C.

Buse multi-carburants : prend en charge le gaz naturel et le carburant liquide, avec tourbillon, taux d'atomisation > 95 %.

1.3 Avantages des buses de turbine à gaz en carbure cémenté

Efficacité : Flux d'air optimisé, poussée augmentée de 510 % et efficacité énergétique augmentée de 35 %.

Durée de vie : Durée de vie de la buse revêtue 8 000 à 20 000 heures (alliage à base de nickel 5 000 à 12 000 heures).

Résistance à la corrosion : R_a 0,10,3 μ m , anti-dépôt de carbone, réduisant la fréquence de maintenance de 20 à 30 %.

Sécurité : Stabilité à haute température, taux de fissures < 0,01 %, conforme à la norme AS9100.

Matériel

2.1 Composants de buse de turbine à gaz en carbure cémenté :

WC : 8894 % en poids , grain ultrafin (D50 0,20,5 μ m) , dureté 1800 - 2200 HV.

Ni : 612 % en poids , résistance à la corrosion (H_2SO_4 , SO_2 < 0,01 mm/an), résistance à la fatigue thermique.

Additifs : Cr_3C_2 (0,30,6 % en poids), inhibe la croissance des grains et augmente la dureté de 6 % ;

TaC (0,10,3 % en poids), augmente la résistance à l'oxydation de 10 %. Revêtement :

CrN (PVD) : dureté 2000 - 2400 HV, coefficient de frottement 0,15, résistance à la température 1100°C, résistance à la corrosion.

AlCrN (PVD) : dureté 3000 - 3500 HV, coefficient de frottement 0,1, résistance à la température 1200°C, résistance à l'oxydation.

TiAlN (PVD) : dureté 2800 - 3200 HV, coefficient de frottement 0,12, résistance à la température 1250°C, résistance à l'érosion.

2.2 Structure du gradient de la buse de turbine à gaz en carbure cémenté

Surface : Faible teneur en Ni (68 % en poids), WC à grain ultrafin (0,20,5 μ m) , dureté 2000 - 2200 HV.

Noyau : Haute teneur en Ni (1012 % en poids), WC à grains fins (0,51 μ m) , KIC 1215 $MPa \cdot m^{1/2}$.

Avantages : Résistance à l'usure augmentée de 25 %, résistance aux chocs thermiques augmentée de 20 %, probabilité de fissure réduite de 20 %.

Préparation : Pressage en couches + frittage HIP (1400°C, 150 MPa).

2.3 Exigences de performance des buses de turbine à gaz en carbure cémenté

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

Dureté : 1800 - 2200 HV (GB/T 79972017).

Résistance à la flexion : 2,02,8 GPa (GB/T 38512015).

Ténacité à la rupture : 1215 MPa·m^{1/2}.

Résistance à l'usure : Taux d'usure < 0,03 mm³ / h (ASTM G65).

Résistance à la corrosion : pH 212, < 0,01 mm/an (ASME PTC 22).

Résistance aux hautes températures : >1200°C, résistance à l'oxydation (<0,01 mg/cm² , 1000 heures).

Sécurité : Pas de fissures, pas de toxicité (ISO 2314).

Procédé de fabrication d'une buse de turbine à gaz en carbure cimenté

3.1 Préparation de la poudre de buse de turbine à gaz en carbure cimenté

Matières premières : WC (D50 0,20,5 µm , pureté >99,95%), Ni (D50 12 µm) , Cr₃C₂ (D50 0,51 µm) , TaC (D50 0,51 µm) .

Broyage à boulets : broyeur à boulets planétaire (billes de ZrO₂, 12:1), 350 tr/min, 1822 heures, écart granulométrique <±0,05 µm , uniformité >98 %.

3.2 Formation

Méthode : Pressage isostatique à froid (CIP) ou moulage de précision.

Paramètres : 300 - 350 MPa, pression de maintien 90 secondes, moule en alliage de titane (écart <±0,03 mm), densité de billette 9,010,5 g/cm³ .

Résultats : Écart dimensionnel <±0,05 mm, taux de fissures <0,5%.

3.3 Frittage

Méthode : Frittage sous vide + HIP.

paramètre:

Déparaffinage : 200 - 600°C, 2°C/min, atmosphère H₂ (O₂ <3 ppm), 10⁻³ Pa .

Frittage : 1400 - 1450°C, 10⁻⁵ 10⁻⁶ Pa, 2,53 h.

HIP : 1400°C, 150 MPa (Ar), 1,52 heure.

Résultats : Densité 15,015,2 g/cm³ , porosité < 0,0005 %, dureté 1800 - 2200 HV.

3.4 Usinage de précision

Rectification : Rectifieuse CNC 5 axes, meule CBN (24 µm) , 4000 tr/min, avance 0,0050,02 mm/passe, écart géométrique <±0,01 mm, Ra 0,10,2 µm .

EDM : Usinage par électroérosion , trous de refroidissement (Ø 0,52 mm), écart <±0,005 mm.

Polissage : Pâte à polir diamantée (0,51 µm) , 1000 tr/min, Ra < 0,1 µm , dépôt anti-carbone augmenté de 25 %.

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

3.5 Revêtement

Méthode : PVD (cible Cr/Al/Ti, >99,99 %).

Paramètres : CrN / AlCrN / TiAlN (25 μm), 10^{-5} Pa, 300400°C, polarisation 100 V, vitesse de dépôt 11,5 $\mu\text{m/h}$.

Résultats : Adhérence >100 N, coefficient de frottement <0,15, résistance à la température >1200°C.

3.6 Détection

Microstructure : MEB (grain 0,20,5 μm), EBSD (contrainte aux joints de grains < 3 %).

Performances : Écart de dureté $\leq \pm 40$ HV (ISO 6508), taux d'usure <0,03 mm^3/h (ASTM G65), résistance à la corrosion (pH 212, <0,01 mm/an).

Géométrie : CMM, écart $\leq \pm 0,005$ mm ; balayage laser, écart du trou de refroidissement $\leq \pm 0,003$ mm.

Contrôle non destructif : rayons X (défauts internes < 0,01 mm), ultrasons (fissures < 0,005 mm).

Essais haute température : choc thermique (ΔT 1000°C, $>10^5$ fois), résistance à l'oxydation (<0,01 mg/cm^2 , 1000 heures).

Scénarios d'application des buses de turbine à gaz en carbure cémenté

Pour des conditions de travail à haute température et haute pression de gaz (1400 - 1600 °C, 1020 MPa), les buses de turbine à gaz en carbure cémenté fournissent les paramètres de processus, les données de test et les recommandations de sélection suivants :

Buses à géométrie fixe (GE Frame 7, gaz naturel) :

Conditions de travail : combustion de gaz naturel, 1500°C, 15 MPa, contenant du SO₂ (0,10,5%).

Type : Buse convergente (diamètre de gorge Ø 50 mm, sortie Ø 80 mm).

Matrice : WC8%Ni (grain ultrafin, D50 0,20,5 μm , Cr₃C₂ 0,5 % en poids, TaC 0,2 % en poids), dureté 2000 - 2200 HV.

Revêtement : PVD AlCrN (4 μm , dureté 3500 HV, frottement 0,1, résistance à la température 1200°C).

Géométrie : rayon de gorge 0,5 mm, trous de refroidissement Ø 1 mm, polis ($R_a < 0,1 \mu\text{m}$).

Traitement : broyage à billes pendant 20 heures, CIP 350 MPa, frittage 1450°C (10^{-6} Pa, 3 heures), HIP 1400°C (150 MPa, 2 heures), rectification 5 axes ($R_a 0,1 \mu\text{m}$), PVD AlCrN (350°C, adhérence >100 N).

Paramètres : débit d'air 1,0 Ma, débit 500 kg/s, fonctionnement à sec.

test:

Durée de vie : 15 000 heures (8 000 heures pour l'alliage à base de nickel, soit une augmentation de 87 %).

Surface : $R_a 0,2 \mu\text{m}$, pas de dépôts de carbone.

Taux d'usure : < 0,02 mm^3/h , résistance à l'oxydation < 0,01 mg/cm^2 .

Choc thermique : ΔT 1000°C, $>10^5$ fois, pas de fissures.

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

Hygiène : Non toxique, conforme à la norme ISO 2314.

Modèle : WCNi+ AlCrN , buse convergente Ø 50 mm, CND régulier.

Buse CD (Siemens SGT800, carburant liquide) :

Conditions de travail : combustion diesel, 1600°C, 18 MPa, contenant H₂S (0,050,2%).

Type : Buse CD (diamètre de gorge Ø 40 mm, sortie Ø 100 mm, géométrie variable).

Matrice : WC10%Ni (grain ultrafin, D50 0,20,5 µ m , Cr3C2 0,6 % en poids , TaC 0,3 % en poids), dureté 2000 - 2200 HV.

Revêtement : PVD TiAlN (5 µ m , dureté 3200 HV, frottement 0,12, résistance à la température 1250°C).

Géométrie : Angle de divergence 15°, trous de refroidissement Ø 1,5 mm, polis (Ra <0,1 µ m) .

Procédé : broyage à billes pendant 22 heures, CIP 350 MPa, frittage 1450°C (10⁻⁶ Pa, 3 heures), HIP 1400°C (150 MPa, 2 heures), EDM (écart d'ouverture <±0,005 mm), PVD TiAlN (400°C, adhérence >100 N).

Paramètres : débit d'air 2,0 Ma, débit 600 kg/s, fonctionnement humide (refroidissement par pulvérisation d'eau).

test:

Durée de vie : 12 000 heures (6 000 heures pour l'alliage à base de nickel, augmentée de 100 %).

Surface : Ra 0,3 µ m , taux de dépôt de carbone < 0,01 mg/ cm² .

Perte par usure : < 0,03 mm³ / h, résistance à la corrosion < 0,01 mm/an.

Choc thermique : ΔT 1100°C, >10⁵ fois, pas de fissures.

Efficacité : Poussée augmentée de 8 %.

Modèle : WCNi+ TiAlN , buse CD Ø 40 mm, fonctionnement humide + CND.

Buse multi-carburants (GE Frame 9, gaz naturel + diesel) :

Conditions de fonctionnement : commutation gaz naturel/diesel, 1550°C, 16 MPa, contenant SO₂/H₂S (0,10,3%).

Type : Buse tourbillonnaire (Ø 60 mm, 12 points de pulvérisation, taux d'atomisation >95%).

Matrice : WC12%Ni (grain ultrafin, D50 0,20,5 µ m , Cr3C2 0,5 % en poids , TaC 0,3 % en poids), dureté 2000 - 2200 HV.

Revêtement : PVD CrN (4 µ m , dureté 2400 HV, frottement 0,15, résistance à la température 1100°C).

Géométrie : angle de tourbillonnement 30°, buse Ø 0,8 mm, polie (Ra <0,1 µ m) .

Procédé : broyage à billes pendant 20 heures, CIP 350 MPa, frittage 1450°C (10⁻⁶ Pa, 3 heures), HIP 1400°C (150 MPa, 2 heures), EDM (écart d'ouverture <±0,003 mm), PVD CrN (300°C, adhérence >100 N).

Paramètres : débit d'air 1,2 Ma, débit de carburant 1000 kg/h, fonctionnement à sec.

test:

Durée de vie : 10 000 heures (5 000 heures pour l'alliage à base de nickel, augmentée de 100 %).

Surface : Ra 0,2 µ m , pas de colmatage.

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

Perte par usure : $< 0,03 \text{ mm}^3 / \text{h}$, résistance à la corrosion $< 0,01 \text{ mm/an}$.

Taux d'atomisation : $> 95 \%$, efficacité de combustion augmentée de 5% .

Choc thermique : $\Delta T 1000^\circ\text{C}$, $> 10^5$ fois, pas de fissures.

Modèle : WCNi+ CrN, buse tourbillonnante $\varnothing 60 \text{ mm}$, nettoyage régulier + CND.

Analyse des performances d'une buse de turbine à gaz en carbure cémenté

paramètre	Buse en carbure	Buse en alliage à base de nickel
Dureté (HV)	1800 - 2200	800 - 1200
Résistance à la flexion (GPa)	2.02.8	1.01.5
Ténacité (KIC, $\text{MPa} \cdot \text{m}^{1/2}$)	1215	2030
Résistance à l'usure (mm^3/h)	$< 0,03$	0,050,1
Résistance à la corrosion (mm/an , pH 212)	$< 0,01$	0,020,05
Résistance à la température ($^\circ\text{C}$)	> 1200	1000 - 1100
Durée de vie (heures)	8000 - 20000	5000 - 12000
Ra (μm)	0.10.3	0,30,8

Points forts:

Résistance à l'usure : Grain ultrafin WC+AlCrN / TiAlN, usure $< 0,03 \text{ mm}^3 / \text{h}$, durée de vie augmentée de 1,52 fois.

Résistance aux hautes températures : le revêtement résiste à l'oxydation ($> 1200^\circ\text{C}$), aux chocs thermiques $> 10^5$ fois.

Résistance à la corrosion : Base Ni + CrN, pH 212, $< 0,01 \text{ mm/an}$.

Efficacité : Flux d'air optimisé, poussée augmentée de 510% et efficacité énergétique augmentée de 35% .

Suggestions d'optimisation pour les buses de turbine à gaz en carbure cémenté

Optimisation des matériaux :

Buse à gaz naturel : WCNi (8 % en poids) + AlCrN ($4 \mu\text{m}$), résistance à la température augmentée de 10% .

Buse de carburant liquide : WCNi (10 % en poids) + TiAlN ($5 \mu\text{m}$), résistance à l'érosion augmentée de 20% .

Buse multi-carburants : WCNi (12 % en poids) + CrN ($4 \mu\text{m}$), résistance à la corrosion augmentée de 15% .

Additifs : Cr₃C₂ 0,6 % en poids, TaC 0,3 % en poids, dureté augmentée de 6% .

Optimisation des processus :

Frittage : HIP 1400°C , 150 MPa, porosité $< 0,0005\%$, résistance à l'usure augmentée de 20% .

Rectification : CNC 5 axes, meule CBN ($24 \mu\text{m}$), écart géométrique $\leq \pm 0,01 \text{ mm}$, Ra $< 0,1 \mu\text{m}$.

revêtement:

AlCrN ($4 \mu\text{m}$, 350°C , polarisation 100 V), résistance à la température augmentée de 15% .

TiAlN ($5 \mu\text{m}$, 400°C , polarisation 100 V), résistance à la corrosion augmentée de 20% .

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

CrN (4 μm , 300°C, polarisation 100 V), résistance à la corrosion augmentée de 25%.

EDM : Écart du trou de refroidissement $\leq \pm 0,003\text{ mm}$, efficacité du flux d'air augmentée de 5 %.

Optimisation des équipements :

Four de frittage : contrôle de température $\pm 2^\circ\text{C}$, 10^{-6} Pa .

CNC 5 axes : Écart $\leq \pm 0,005\text{ mm}$.

Équipement de revêtement : taux de dépôt 11,5 $\mu\text{m/h}$, écart $\leq \pm 0,05\text{ }\mu\text{m}$.

Adaptation des conditions de travail :

Gaz naturel : WCNi+ AlCrN , vitesse 0,81,2 Ma, fonctionnement à sec.

Combustible liquide : WCNi+ TiAlN , vitesse 1,52,5 Ma, fonctionnement humide.

Multi-combustible : WCNi+ CrN , vitesse 1,01,5 Ma, interrupteur sec/humide.

Tests et vérifications :

Microstructure : MEB (grain 0,20,5 μm) , EBSD (contrainte aux joints de grains $< 3\%$).

Performances : ASTM G65 ($< 0,03\text{ mm}^3/\text{h}$), résistance à la corrosion (pH 212, $< 0,01\text{ mm/an}$),
résistance à la température ($> 1200^\circ\text{C}$, $< 0,01\text{ mg/cm}^2$).

Géométrie : CMM (écart $< \pm 0,005\text{ mm}$), balayage laser (écart d'ouverture $< \pm 0,003\text{ mm}$).

Test : débit d'air 0,82,5 mA, durée de vie 10000 - 15000 heures, Ra 0,20,3 μm .

Normes et spécifications

GB/T 183762014 : Porosité $< 0,01\%$.

GB/T 38502015 : Écart de densité $\leq \pm 0,1\text{ g/cm}^3$.

GB/T 38512015 : Résistance 2,0-2,8 GPa.

GB/T 7997-2017 : Dureté 1800-2200 HV.

ASME PTC 22 : Test de performance, écart de poussée $\leq \pm 1\%$.

ISO 2314 : Réception des turbines à gaz, sécurité.

ASTM G65 : Taux d'usure $< 0,03\text{ mm}^3/\text{h}$.

ISO 6508 : Écart de dureté $< \pm 40\text{ HV}$.

AS9100 : Gestion de la qualité aérospatiale.

en conclusion

- 2200 HV), résistance à l'usure ($< 0,03\text{ mm}^3/\text{h}$), résistance aux hautes températures ($> 1200^\circ\text{C}$),
résistance à la corrosion (pH 212, $< 0,01\text{ mm/an}$) et résistance à la fatigue thermique ($> 10^5$ fois)
en optimisant les matériaux (grain ultrafin WC 0,20,5 μm , Ni 612 wt %, Revêtement AlCrN /
TiAlN / CrN) et procédés (frittage HIP 1400 $^\circ\text{C}$, 150 MPa, revêtement PVD 300-400 $^\circ\text{C}$). La buse
est adaptée aux conditions de géométrie fixe, CD et multi-combustibles, avec une vitesse de 0,8 à
2,5 Ma, une augmentation de poussée de 5 à 10 %, une durée de vie de 10 000 à 15 000 heures et
un Ra de 0,2 à 0,3 μm . L'optimisation des grains ultrafins, de l'épaisseur du revêtement et des
procédés d'électroérosion peut réduire les coûts. Les défis résident dans l'usinage de haute précision
(augmentation des coûts de 20 %) et dans les tests et vérifications à haute température.

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

Annexe :

Vanne de pipeline chimique en alliage dur

À base de carbure de tungstène (WC) (WC 88-94 % en poids , Ni 612 % en poids). Grâce à une rectification de précision, un polissage et un revêtement PVD résistant à la corrosion (tel que CrN , AlCrN , TiAlN , 25 μ m) , ils atteignent une dureté élevée (1800 - 2200 HV), une résistance à l'usure (volume d'usure < 0,03 mm³ / h, ASTM G65), une résistance à la corrosion (< 0,01 mm/an, pH 212, contenant H₂S, HCl, H₂SO₄) et une résistance à haute température (> 1000 °C, résistance à l'oxydation). Les vannes sont utilisées dans les pipelines chimiques (pétrole, gaz naturel, milieux acides et alcalins), contrôlent le débit, la pression et la coupure, résistent aux fluides corrosifs (H₂SO₄ 0,515 %, HCl < 3 %), aux hautes températures (300 - 1000 °C) et aux hautes pressions (1050 MPa), avec une durée de vie de 515 ans et une rugosité de surface de Ra 0,10,3 μ m . Sur la base des conditions de travail (API 6D, ASME B16.34) et des normes (GB/T 12224, NACE MR0175) des pipelines chimiques, cet article décrit les vannes, les procédés de fabrication, les performances, les applications et les directions d'optimisation.

Présentation des vannes de pipeline chimique en carbure cimenté

1.1 Définition de la vanne de pipeline chimique en carbure cimenté :

Les vannes de pipeline chimique en carbure cimenté utilisent une matrice WC à grains ultrafins (0,20,5 μ m) , une phase de liaison à base de Ni (résistance à la corrosion) et un revêtement PVD résistant à la corrosion (CrN , AlCrN , TiAlN) , par meulage de haute précision (écart géométrique <±0,01 mm) ou polissage (Ra <0,1 μ m) , pour répondre aux exigences élevées de résistance à la corrosion, aux températures élevées, aux pressions élevées et à l'usure des pipelines chimiques, contrôler le débit du fluide, la pression ou la coupure. Caractéristiques :

Dureté élevée : 1800 - 2200 HV, la résistance à l'usure est 35 fois meilleure que l'acier inoxydable (400 - 600 HV).

Résistance à la corrosion : Résistant aux acides et aux alcalis (pH 212, <0,01 mm/an), résistant à H₂S, HCl, H₂SO₄, conforme à la norme NACE MR0175.

Résistance aux hautes températures : Le revêtement est résistant à l'oxydation (>1000°C) et le substrat est résistant aux chocs thermiques (ΔT 800°C, >10⁵ fois).

Faible frottement : Le coefficient de frottement du revêtement est < 0,15, ce qui réduit l'adhérence et l'érosion.

Résistance à l'usure : perte d'usure < 0,03 mm³ / h, durée de vie 5-15 ans.

Applications : Pétrochimie (raffinage, gaz naturel), traitement chimique (acides, alcalis, chlorures), produits pharmaceutiques, pâte à papier.

1.2 Types de vannes de pipeline chimique en carbure cimenté

Robinet à boisseau sphérique : 1/220 pouce, 150 - 2500 lb , adapté à la commutation rapide, au contrôle du débit, au taux d'étanchéité > 99,9 %.

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

Robinet-vanne : 136", 150 - 4500 lb , adapté à une ouverture/fermeture complète, résistance à haute pression .

Vanne d'arrêt : 1/224", 150 - 2500 lb , contrôle précis du débit, résistance aux hautes températures.

Clapet anti-retour : 124 po, 150 à 2 500 lb , anti-refoulement, résistant à la corrosion.

Vanne papillon : 248 pouces, 150 - 600 lb , légère, adaptée aux grands diamètres et aux basses pressions.

1.3 Avantages des vannes de pipeline chimique en carbure cémenté

Efficacité : ouverture et fermeture rapides (rotation de la vanne à boisseau sphérique à 90°), perte de débit < 5 %, conformément à la norme API 6D.

Durée de vie : Les vannes revêtues ont une durée de vie de 515 ans (15 ans pour l'acier inoxydable).

Résistance à la corrosion : Ra 0,10,3 μ m , anti-adhérence, fréquence d'entretien réduite de 30%.

Sécurité : Zéro fuite (API 598), taux de fissures < 0,01 %, conformément à la norme ASME B16.34.

Matériel

Composition de la matrice des vannes de pipeline chimique en carbure cémenté :

WC : 8894 % en poids , grain ultrafin (D50 0,20,5 μ m) , dureté 1800 - 2200 HV.

Ni : 612 % en poids , résistance à la corrosion (H₂SO₄, HCl, H₂S <0,01 mm/an), résistance à la fatigue thermique.

Additifs : Cr₃C₂ (0,30,6 % en poids), inhibe la croissance des grains et augmente la dureté de 6 % ;

TaC (0,10,3 % en poids), augmente les propriétés antioxydantes de 10 %.

Revêtement de vannes de pipeline chimique en carbure cémenté

CrN (PVD) : dureté 2000 - 2400 HV, coefficient de frottement 0,15, résistance à la température 1000°C, résistant au H₂SO₄.

AlCrN (PVD) : dureté 3000 - 3500 HV, coefficient de frottement 0,1, résistance à la température 1100°C, résistant aux chlorures.

TiAlN (PVD) : dureté 2800 - 3200 HV, coefficient de frottement 0,12, résistance à la température 1050°C, résistance à l'érosion.

2.2 Structure du gradient

Surface : Faible teneur en Ni (68 % en poids), WC à grain ultrafin (0,20,5 μ m) , dureté 2000 - 2200 HV.

Noyau : Haute teneur en Ni (1012 % en poids), WC à grains fins (0,51 μ m) , KIC 1215 MPa·m^{1/2}.

Avantages : Résistance à l'usure augmentée de 25 %, résistance aux chocs thermiques augmentée de 20 %, probabilité de fissure réduite de 20 %.

Préparation : Pressage en couches + frittage HIP (1400°C, 150 MPa).

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

2.3 Exigences de performance

Dureté : 1800 - 2200 HV (GB/T 79972017).

Résistance à la flexion : 2,02,8 GPa (GB/T 38512015).

Ténacité à la rupture : 1215 MPa·m^{1/2}.

Résistance à l'usure : Taux d'usure < 0,03 mm³ / h (ASTM G65).

Résistance à la corrosion : pH 212, < 0,01 mm/an (NACE MR0175).

Résistance aux hautes températures : >1000°C, résistance à l'oxydation (<0,01 mg/cm² , 1000 heures).

Sécurité : Zéro fuite (API 598), conformément à la norme ASME B16.34.

Procédé de fabrication de vannes de pipeline chimique en carbure cémenté

3.1 Préparation de la poudre

Matières premières : WC (D50 0,20,5 μm , pureté >99,95%), Ni (D50 12 μm) , Cr₃C₂ (D50 0,51 μm) , TaC (D50 0,51 μm) .

Broyage à boulets : broyeur à boulets planétaire (billes de ZrO₂, 12:1), 350 tr/min, 1822 heures, écart granulométrique <±0,05 μm , uniformité >98 %.

3.2 Formation

Méthode : Pressage isostatique à froid (CIP) ou moulage de précision.

Paramètres : 300 - 350 MPa, pression de maintien 90 secondes, moule en alliage de titane (écart <±0,03 mm), densité de billette 9,010,5 g/cm³ .

Résultats : Écart dimensionnel <±0,05 mm, taux de fissures <0,5%.

3.3 Frittage

Méthode : Frittage sous vide + HIP.

paramètre:

Déparaffinage : 200 - 600°C, 2°C/min, atmosphère H₂ (O₂ <3 ppm), 10⁻³ Pa .

Frittage : 1400 - 1450°C, 10⁻⁵ - 10⁻⁶ Pa, 2,53 h.

HIP : 1400°C, 150 MPa (Ar), 1,52 heure.

Résultats : Densité 15,015,2 g/cm³ , porosité < 0,0005 % , dureté 1800 - 2200 HV.

3.4 Usinage de précision

Rectification : Rectifieuse CNC 5 axes, meule CBN (24 μm) , 4000 tr/min, avance 0,0050,02 mm/passe, écart géométrique <±0,01 mm, Ra 0,10,2 μm .

EDM : Usinage par électroérosion, trou de noyau de valve (Ø 0,52 mm), écart <±0,005 mm.

Polissage : Pâte à polir diamantée (0,51 μm) , 1000 tr/min, Ra < 0,1 μm , anti-adhérence augmentée

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

de 25 %.

3.5 Revêtement

Méthode : PVD (cible Cr/Al/Ti, >99,99 %).

Paramètres : CrN / AlCrN / TiAlN (25 μ m) , 10^{-5} Pa, 300 - 400°C, polarisation 100 V, vitesse de dépôt 11,5 μ m /h.

Résultats : Adhérence >100 N, coefficient de frottement <0,15, résistance à la température >1000°C.

3.6 Détection

Microstructure : MEB (grain 0,20,5 μ m) , EBSD (contrainte aux joints de grains < 3 %).

Performances : Écart de dureté $\leq \pm 40$ HV (ISO 6508), taux d'usure <0,03 mm³/h (ASTM G65), résistance à la corrosion (pH 212, <0,01 mm/an).

Géométrie : CMM, écart $\leq \pm 0,005$ mm ; balayage laser, écart du trou de noyau de valve $\leq \pm 0,003$ mm.

Contrôle non destructif : rayons X (défauts internes < 0,01 mm), ultrasons (fissures < 0,005 mm).

Test de performance : Taux de fuite < 0,01 cm³/s (API 598), résistance à la pression (1504500 lb) .

Scénarios d'application des vannes de pipeline chimique en carbure cémenté

Pour les fluides corrosifs (H₂SO₄, HCl, H₂S), les conditions de travail à haute température (300 - 1000 °C) et à haute pression (1050 MPa), les vannes de pipeline chimique en carbure cémenté fournissent les paramètres de processus, les données de test et les recommandations de sélection suivants :

Robinet à boisseau sphérique en alliage dur pour pipeline chimique (pétrochimie, H₂SO₄ 10%) :

Conditions de travail : acide sulfurique (10%, pH 2), 500°C, 20 MPa.

Type : Robinet à boisseau sphérique flottant (2 po, 600 lb , à bride).

Matrice : WC8%Ni (grain ultrafin, D50 0,20,5 μ m , Cr₃C₂ 0,5 % en poids , TaC 0,2 % en poids), dureté 2000 - 2200 HV.

Revêtement : PVD CrN (4 μ m , dureté 2400 HV, frottement 0,15, résistance à la température 1000°C).

Géométrie : rondeur de la sphère $\leq \pm 0,005$ mm, surface d'étanchéité polie (Ra <0,1 μ m) .

Traitement : broyage à billes pendant 20 heures, CIP 350 MPa, frittage 1450°C (10^{-6} Pa, 3 heures), HIP 1400°C (150 MPa, 2 heures), rectification 5 axes (Ra 0,1 μ m) , PVD CrN (300°C, adhérence >100 N).

Paramètres : débit 100 m³/h, ouverture et fermeture rapides à 90°, marche à sec.

test:

Durée de vie : 10 ans (3 ans pour l'innox, 3,3 fois plus longtemps) .

Surface : Ra 0,2 μ m , aucune adhérence.

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

Taux d'usure : $< 0,02 \text{ mm}^3 / \text{h}$, résistance à la corrosion $< 0,01 \text{ mm/an}$.

Taux de fuite : $< 0,01 \text{ cm}^3/\text{s}$ (API 598).

Résistance à la pression : 30 MPa, aucune déformation.

Sélection : WCNi+ CrN, robinet à boisseau sphérique 2 pouces, CND régulier.

Vanne à guillotine en alliage dur pour pipeline chimique (gaz naturel, contenant du H₂S) :

Conditions de travail : gaz naturel (H₂S 0,10,5%), 600°C, 30 MPa.

Type : Robinet-vanne à coin (4 po, 900 lb, à bride).

Matrice : WC10%Ni (grain ultrafin, D50 0,20,5 μm , Cr3C2 0,6 % en poids, TaC 0,3 % en poids), dureté 2000 - 2200 HV.

Revêtement : PVD AlCrN (5 μm , dureté 3500 HV, frottement 0,1, résistance à la température 1100°C).

Géométrie : Angle du disque de soupape 5°, surface d'étanchéité polie ($R_a < 0,1 \mu\text{m}$).

Traitement : broyage à billes pendant 22 heures, CIP 350 MPa, frittage 1450°C (10^{-6} Pa , 3 heures), HIP 1400°C (150 MPa, 2 heures), rectification 5 axes ($R_a 0,1 \mu\text{m}$), PVD AlCrN (350°C, adhérence $> 100 \text{ N}$).

Paramètres : débit 200 m^3/h , entièrement ouvert/entièrement fermé, fonctionnement humide (nettoyage à l'eau).

test:

Durée de vie : 12 ans (4 ans pour l'inox, soit 3 fois plus longtemps).

Surface : $R_a 0,3 \mu\text{m}$, pas de dépôts de carbone.

Perte par usure : $< 0,03 \text{ mm}^3 / \text{h}$, résistance à la corrosion $< 0,01 \text{ mm/an}$.

Taux de fuite : $< 0,01 \text{ cm}^3/\text{s}$ (API 598).

Résistance à la pression : 45 MPa, pas de fissures.

Sélection : WCNi+ AlCrN, vanne à guillotine de 4 pouces, fonctionnement humide + CND.

d'arrêt de canalisation chimique en alliage dur (chlorure, HCl 2%) :

Conditions de travail : acide chlorhydrique (2%, pH 1,5), 400°C, 15 MPa.

Type : Robinet à soupape CC (1 po, 600 lb, fileté).

Matrice : WC12%Ni (grain ultrafin, D50 0,20,5 μm , Cr3C2 0,5 % en poids, TaC 0,3 % en poids), dureté 2000 - 2200 HV.

Revêtement : PVD TiAlN (4 μm , dureté 3200 HV, frottement 0,12, résistance à la température 1050°C).

Géométrie : Noyau de valve conique 10°, surface d'étanchéité polie ($R_a < 0,1 \mu\text{m}$).

Procédé : broyage à billes pendant 20 heures, CIP 350 MPa, frittage 1450°C (10^{-6} Pa , 3 heures), HIP 1400°C (150 MPa, 2 heures), EDM (écart d'ouverture $< \pm 0,005 \text{ mm}$), PVD TiAlN (400°C, adhérence $> 100 \text{ N}$).

Paramètres : débit 50 m^3/h , régulation précise, marche à sec.

test:

Durée de vie : 8 ans (2 ans pour l'inox, 4 fois plus longtemps).

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

Surface : Ra 0,2 μm , pas de corrosion.

Perte par usure : < 0,03 mm^3 / h , résistance à la corrosion < 0,01 mm/an.

Taux de fuite : < 0,01 cm^3/s (API 598).

Résistance à la pression : 25 MPa, aucune déformation.

Sélection : WCNi+ TiAlN , vanne d'arrêt 1 pouce, nettoyage régulier+NDT .

Clapet anti-retour pour canalisation chimique en alliage dur (pétrochimie, contenant du chlorure) :

Conditions de travail : Solution de chlorure (10000 ppm), 450°C, 20 MPa.

Type : Clapet anti-retour de levage pour pipeline chimique en carbure (3 pouces, 600 lb , bride).

Matrice : WC10%Ni (grain ultrafin, D50 0,20,5 μm , Cr3C2 0,5 % en poids , TaC 0,2 % en poids), dureté 2000 - 2200 HV.

Revêtement : PVD AlCrN (4 μm , dureté 3500 HV, frottement 0,1, résistance à la température 1100°C).

Géométrie : Rondeur du disque $\leq \pm 0,005 \text{ mm}$, surface d'étanchéité polie (Ra < 0,1 μm) .

Traitement : broyage à billes pendant 20 heures, CIP 350 MPa, frittage 1450°C (10^{-6} Pa, 3 heures), HIP 1400°C (150 MPa, 2 heures), rectification 5 axes (Ra 0,1 μm) , PVD AlCrN (350°C, adhérence >100 N).

Paramètres : débit 150 m^3/h , anti-retour, fonctionnement humide.

test:

Durée de vie : 10 ans (3 ans pour l'inox, 3,3 fois plus longtemps) .

Surface : Ra 0,2 μm , aucune adhérence.

Taux d'usure : < 0,02 mm^3 / h , résistance à la corrosion < 0,01 mm/an.

Taux de fuite : < 0,01 cm^3/s (API 598).

Résistance à la pression : 30 MPa, pas de fissures.

Sélection : WCNi+ AlCrN , clapet anti-retour 3 pouces, fonctionnement humide + CND.

Vanne papillon pour canalisation chimique en alliage dur (pharmaceutique, milieu acide basse pression) :

Conditions de travail : acide acétique (80%, pH 3), 300°C, 5 MPa.

Type : Vanne papillon triple excentrique en carbure pour pipeline chimique (6 pouces, 150 lb , bride).

Matrice : WC8%Ni (grain ultrafin, D50 0,20,5 μm , Cr3C2 0,5 % en poids , TaC 0,2 % en poids), dureté 2000 - 2200 HV.

Revêtement : PVD CrN (3 μm , dureté 2400 HV, frottement 0,15, résistance à la température 1000°C).

Géométrie : Excentricité du disque 10°, surface d'étanchéité polie (Ra < 0,1 μm) .

Traitement : broyage à billes pendant 20 heures, CIP 350 MPa, frittage 1450°C (10^{-6} Pa, 3 heures), HIP 1400°C (150 MPa, 2 heures), rectification 5 axes (Ra 0,1 μm) , PVD CrN (300°C,

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

adhérence >100 N).

Paramètres : débit 300 m³/h, ouverture et fermeture rapides, marche à sec.

test:

Durée de vie : 7 ans (2 ans pour l'inox, 3,5 fois plus longtemps) .

Surface : Ra 0,2 µm , pas de corrosion.

Perte par usure : < 0,03 mm³ / h, résistance à la corrosion < 0,01 mm/an.

Taux de fuite : < 0,01 cm³/s (API 598).

Résistance à la pression : 10 MPa, aucune déformation.

Sélectionnez le type : WCNi+ CrN , vanne papillon 6 pouces, nettoyage régulier + CND.

Analyse des performances des vannes de pipeline chimique en carbure cémenté

paramètre	soupape en carbure	Vannes en acier inoxydable
Dureté (HV)	1800 - 2200	400 - 600
Résistance à la flexion (GPa)	2.02.8	1.52.0
Ténacité (KIC, MPa·m ^{1/2})	1215	50 - 100
Résistance à l'usure (mm ³ /h)	<0,03	0.10.3
Résistance à la corrosion (mm/an, pH 212)	<0,01	0,050,1
Résistance à la température (°C)	>1000	400 - 800
Durée de vie (années)	515	15
Ra (µm)	0.10.3	0,51,0

Points forts:

Résistance à l'usure : Grain ultrafin WC+CrN / AlCrN / TiAlN , usure < 0,03 mm³ / h, durée de vie augmentée de 34 fois.

Résistance à la corrosion : à base de Ni + AlCrN , pH 212, < 0,01 mm/an, meilleure que 254SMO et l'alliage 20.

Résistance aux hautes températures : le revêtement résiste à l'oxydation (>1000°C), aux chocs thermiques >10⁵ fois.

Efficacité : Zéro fuite (API 598), perte de débit < 5 %, conformément à API 6D.

Suggestions d'optimisation pour les vannes de pipelines chimiques en carbure cémenté

Optimisation des matériaux :

Conditions d'acide sulfurique : WCNi (8 % en poids) + CrN (4 µ m) , résistance à H₂SO₄ augmentée de 20 %.

H₂S/gaz naturel : WCNi (10 % en poids) + AlCrN (5 µ m) , anti-sulfuration augmentée de 25 %.

Chlorure/HCl : WCNi (12 % en poids) + TiAlN (4 µ m) , résistance au chlorure augmentée de 20 %.

Additifs : Cr₃C₂ 0,6 % en poids , TaC 0,3 % en poids , dureté augmentée de 6 %.

Optimisation des processus :

Frittage : HIP 1400°C, 150 MPa, porosité <0,0005%, résistance à l'usure augmentée de 20%.

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

Rectification : CNC 5 axes, meule CBN (24 μ m) , écart géométrique $<\pm 0,01$ mm, Ra $<0,1$ μ m .
revêtement:

CrN (4 μ m , 300°C, polarisation 100 V), résistance au H₂SO₄ augmentée de 25%.

AlCrN (5 μ m , 350°C, polarisation 100 V), résistance H₂S augmentée de 20 %.

TiAlN (4 μ m , 400°C, polarisation 100 V), résistance au HCl augmentée de 20%.

EDM : Écart du trou du noyau de valve $<\pm 0,003$ mm, taux d'étanchéité augmenté de 5 %.

Optimisation des équipements :

Four de frittage : contrôle de température $\pm 2^\circ\text{C}$, 10^{-6} Pa.

CNC 5 axes : Écart $<\pm 0,005$ mm.

Équipement de revêtement : taux de dépôt 11,5 μ m /h, écart $<\pm 0,05$ μ m .

Adaptation des conditions de travail :

Acide sulfurique : WCNi+ CrN , 150 - 600 lb , fonctionnement à sec.

Gaz naturel/H₂S : WCNi+ AlCrN , 600 - 2500 lb , fonctionnement humide.

Chlorure/HCl : WCNi+ TiAlN , 150 - 900 lb , fonctionnement humide/sec.

Acide pharmaceutique/acétique : WCNi+ CrN , 150 - 300 lb , fonctionnement à sec.

Tests et vérifications :

Microstructure : MEB (grain 0,20,5 μ m) , EBSD (contrainte aux joints de grains < 3 %).

Performances : ASTM G65 ($<0,03$ mm³/h), résistance à la corrosion (pH 212, $<0,01$ mm/an),
résistance à la température ($>1000^\circ\text{C}$, $<0,01$ mg/cm²) .

Géométrie : CMM (écart $<\pm 0,005$ mm), balayage laser (écart d'ouverture $<\pm 0,003$ mm).

Test : Taux de fuite $< 0,01$ cm³/s (API 598), durée de vie 712 ans, Ra 0,20,3 μ m .

Normes et spécifications pour les vannes de pipelines chimiques en carbure cémenté

GB/T 122242015 : Exigences générales pour les vannes en acier.

GB/T 183762014 : Porosité $< 0,01$ %.

GB/T 38502015 : Écart de densité $<\pm 0,1$ g/ cm³ .

GB/T 38512015 : Résistance 2,0-2,8 GPa .

GB/T 79972017 : Dureté 1800 - 2200 HV.

API 6D : Vannes de canalisation, taux de fuite $< 0,01$ cm³ / s.

ASME B16.34 : Valeurs nominales de pression et de température des vannes.

NACE MR0175 : Résistance à la fissuration sous contrainte due au sulfure.

ASTM G65 : Taux d'usure $< 0,03$ mm³ / h.

ISO 6508 : Écart de dureté $<\pm 40$ HV.

Les vannes de pipeline chimique en carbure cémenté atteignent une dureté élevée (1800-2200 HV), une résistance à l'usure ($<0,03$ mm³/h), une résistance à la corrosion (pH 212, $<0,01$ mm/an) et une résistance à haute température ($>1000^\circ\text{C}$) en optimisant les matériaux (grain ultrafin WC 0,20,5 μ m , Ni 612 wt % , CrN / AlCrN / TiAlN revêtement) et les procédés (frittage HIP 1400°C , 150 MPa, revêtement PVD 300-400 $^\circ\text{C}$) . Les vannes conviennent aux vannes à boisseau sphérique, aux vannes à guillotine, aux vannes à soupape, aux clapets anti-retour et aux vannes papillon. Elles sont

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

compatibles avec les conditions de travail de l'acide sulfurique, du H₂S, du chlorure et de l'acide acétique, avec des pressions de 150 à 4 500 lb , une durée de vie de 712 ans, un Ra de 0,2 à 0,3 µm et une fuite nulle (API 598). L'optimisation des grains ultrafins, de l'épaisseur du revêtement et du procédé d'électroérosion permet de réduire les coûts (de 1 000 à 5 000 yuans par pièce) . Les défis résident dans l'usinage de haute précision (augmentation des coûts de 20 %) et la vérification des tests de corrosion.

Annexe :

Pièces d'équipement de fabrication de papier en carbure

Les pièces d'équipement de fabrication de papier en carbure cimenté sont fabriquées à partir de carbure de tungstène (WC) (WC 88-94 % en poids , Ni 612 % en poids). Grâce à un meulage de précision, un polissage et un revêtement PVD résistant à la corrosion (tel que CrN , DLC, ZrN , 25 μm) , une dureté élevée (1800-2200 HV), une résistance à l'usure (volume d' usure < 0,03 mm^3/h , ASTM G65), une résistance à la corrosion (< 0,01 mm/an , pH 410, contenant des chlorures et des sulfates) et une résistance aux chocs (KIC 1215 $\text{MPa}\cdot\text{m}^{1/2}$) sont obtenues. Les pièces sont utilisées dans les équipements de fabrication du papier (tels que la réduction en pâte, le formage, le pressage, le séchage) et sont soumises à une humidité élevée (90 à 100 % HR), à des boues corrosives (pH 410, $\text{Cl}^- < 5\,000\text{ ppm}$), à des températures élevées (80 à 200 $^{\circ}\text{C}$) et à l'usure mécanique. Leur durée de vie est de 624 mois et leur rugosité de surface est de $\text{Ra } 0,10,3\text{ }\mu\text{m}$. Sur la base des conditions de travail (TAPPI TIS, ISO 287) et des normes (GB/T 7997, NACE MR0175) de l'industrie papetière, cet article décrit les pièces, le procédé de fabrication, les performances, l'application et les orientations d'optimisation.

Pièces d'équipement de fabrication de papier en carbure

1.1 Définition des pièces d'équipement de fabrication de papier en carbure cimenté

Les pièces d'équipement de fabrication de papier en carbure cimenté utilisent une matrice WC à grains ultrafins (0,2 à 0,5 μm) , une phase de liaison à base de nickel (résistante à la corrosion) et un revêtement PVD résistant à la corrosion (CrN , DLC, ZrN) . Grâce à un meulage de haute précision (écart géométrique $< \pm 0,01\text{ mm}$) ou un polissage ($\text{Ra} < 0,1\text{ }\mu\text{m}$) , elles répondent aux exigences élevées d'humidité, de corrosion, d'usure et d'impact des équipements de fabrication de papier et sont utilisées pour la mise en pâte, le formage, le pressage, le séchage et d'autres opérations.

Caractéristiques des pièces d'équipement de fabrication de papier en carbure cimenté :

Dureté élevée : 1800 - 2200 HV, la résistance à l'usure est 35 fois meilleure que l'acier inoxydable (400 - 600 HV).

Résistance à la corrosion : Résistant aux acides et aux alcalis (pH 410, < 0,01 mm/an), résistant aux chlorures et aux sulfates, conformément à la norme NACE MR0175.

Faible frottement : Le coefficient de frottement du revêtement est < 0,15, ce qui réduit l'adhérence de la boue.

Résistance à l'usure : taux d'usure < 0,03 mm^3/h , durée de vie 624 mois.

Applications : lames de réduction en pâte, grattoirs à fil de formage, rouleaux de presse, grattoirs de sècheuse, coupe-papier.

1.2 Types de pièces d'équipement de fabrication de papier en carbure

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

Lames de dépulpage en carbure

Les lames du batteur et du raffineur coupent les fibres à des vitesses de 500 à 2 000 tr/min.

Grattoir à mailles en carbure

dans la section de formage, nettoyage de la surface de l'écran, vitesse 50 - 200 m/min.

Rouleau de presse en carbure

Section de presse surface du rouleau, égouttage, pression 50 - 200 kN /m.

Grattoir de séchage en carbure

Racleur dans la section de séchage, nettoyage de la boue, température 100 - 200°C.

Coupe-papier en carbure

Découpe du papier fini à une vitesse de 100 à 300 m/min.

1.3 Avantages des pièces d'équipement de fabrication de papier en carbure cémenté

Efficacité : Augmente le taux de hachage des fibres de 20 à 30 % (lame de réduction en pâte), taux de nettoyage de la bande > 95 % (grattoir).

Durée de vie : Les pièces revêtues ont une durée de vie de 624 mois (acier inoxydable 26 mois).

Résistance à la corrosion : Ra 0,10,3 μm , anti-adhérence, fréquence d'entretien réduite de 25%.

Sécurité : résistance aux chocs ($\text{KIC } 1215 \text{ MPa} \cdot \text{m}^{1/2}$) , taux de fissuration < 0,01 % , conforme au TAPPI TIS.

Matériel

2.1 Matrice des composants des pièces d'équipement de fabrication de papier en carbure cémenté :

WC : 8894 % en poids , grain ultrafin (D50 0,20,5 μm) , dureté 1800 - 2200 HV.

Ni : 612 % en poids , résistant à la corrosion (Cl^- , SO_4^{2-} < 0,01 mm/an), résistant aux chocs.

Additifs : Cr3C2 (0,30,6 % en poids) , inhibe la croissance des grains et augmente la dureté de 6 % ;

TaC (0,10,3 % en poids) , augmente la résistance à l'oxydation de 10 % . Revêtement :

CrN (PVD) : dureté 2000 - 2400 HV, coefficient de frottement 0,15, résistance à la température 800°C, résistant aux sulfates.

DLC (PVD) : dureté 3000 - 3500 HV, coefficient de frottement <0,1, résistance à la température 600°C, anti-adhérence.

ZrN (PVD) : dureté 2200 - 2600 HV, coefficient de frottement 0,12, résistance à la température 900°C, résistant aux chlorures.

2.2 Structure du gradient des pièces d'équipement de fabrication de papier en carbure cémenté

Surface : Faible teneur en Ni (68 % en poids) , WC à grain ultrafin (0,20,5 μm) , dureté 2000 - 2200 HV.

Noyau : Haute teneur en Ni (1012 % en poids) , WC à grains fins (0,51 μm) , $\text{KIC } 1215 \text{ MPa} \cdot \text{m}^{1/2}$.

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

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

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

Avantages : Résistance à l'usure augmentée de 25 %, résistance aux chocs augmentée de 20 %, probabilité de fissure réduite de 20 %.

Préparation : Pressage en couches + frittage HIP (1400°C, 150 MPa).

2.3 Exigences de performance pour les pièces d'équipement de fabrication de papier en carbure cémenté

Dureté : 1800 - 2200 HV (GB/T 79972017).

Résistance à la flexion : 2,02,8 GPa (GB/T 38512015).

Ténacité à la rupture : 1215 MPa·m^{1/2}.

Résistance à l'usure : Taux d'usure < 0,03 mm³ / h (ASTM G65).

Résistance à la corrosion : pH 410, < 0,01 mm/an (NACE MR0175).

Résistance aux hautes températures : >600°C, résistance à l'oxydation (<0,01 mg/cm², 500 heures).

Sécurité : résistant aux chocs, sans fissuration (ISO 287).

Processus de fabrication

3.1 Préparation de la poudre de pièces d'équipement de fabrication de papier en carbure cémenté

Matières premières : WC (D50 0,20,5 µm, pureté >99,95%), Ni (D50 12 µm), Cr₃C₂ (D50 0,51 µm), TaC (D50 0,51 µm).

Broyage à boulets : Broyeur à boulets planétaire (billes de ZrO₂, 12:1), 350 tr/min, 1822 heures, écart granulométrique <±0,05 µm, uniformité >98 %.

3.2 Formage de pièces d'équipement de fabrication de papier en carbure

Méthode : Pressage isostatique à froid (NEP) ou moulage de précision.

Paramètres : 300 - 350 MPa, pression de maintien 90 secondes, moule en alliage de titane (écart < ± 0,03 mm), densité de la billette 9,0 - 10,5 g/cm³.

Résultats : Écart dimensionnel <±0,05 mm, taux de fissures <0,5%.

3.3 Frittage de pièces d'équipement de fabrication de papier en carbure cémenté

Méthode : Frittage sous vide + HIP.

paramètre:

Déparaffinage : 200 - 600°C, 2°C/min, atmosphère H₂ (O₂ <3 ppm), 10⁻³ Pa.

Frittage : 1400 - 1450°C, 10⁻⁵ - 10⁻⁶ Pa, 2,53 h.

HIP : 1400°C, 150 MPa (Ar), 1,52 heure.

Résultats : Densité 15,015,2 g/cm³, porosité < 0,0005 %, dureté 1800 - 2200 HV.

3.4 Usinage de précision des pièces d'équipement de fabrication de papier en carbure

Rectification : Rectifieuse CNC 5 axes, meule CBN (24 µm), 4000 tr/min, avance 0,0050,02

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

mm/passe, écart géométrique $\leq \pm 0,01$ mm, Ra 0,10,2 μ m .

EDM : Usinage par électroérosion , trou d'insertion ($\varnothing$ 0,52 mm), écart $\leq \pm 0,005$ mm.

Polissage : Pâte à polir diamantée (0,51 μ m) , 1000 tr/min, Ra < 0,1 μ m , anti-adhérence augmentée de 25 %.

3.5 Revêtement des pièces d'équipement de fabrication de papier en carbure cémenté

Méthode : PVD (cible Cr/Zr, >99,99%).

Paramètres : CrN /DLC/ ZrN (25 μ m) , 10^{-5} Pa, 250350°C, polarisation 100 V, taux de dépôt 11,5 μ m /h.

Résultats : Adhérence >100 N, coefficient de frottement <0,15, résistance à la température >600°C.

3.6 Inspection des pièces d'équipement de fabrication de papier en carbure

Microstructure : MEB (grain 0,20,5 μ m) , EBSD (contrainte aux joints de grains < 3 %).

Performances : Écart de dureté $\leq \pm 40$ HV (ISO 6508), taux d'usure <0,03 mm³/h (ASTM G65), résistance à la corrosion (pH 410, <0,01 mm/an).

Géométrie : CMM, écart $\leq \pm 0,005$ mm ; balayage laser, écart d'ouverture $\leq \pm 0,003$ mm.

Contrôle non destructif : rayons X (défauts internes < 0,01 mm), ultrasons (fissures < 0,005 mm).

Tests de performance : résistance aux chocs (KIC 1215 MPa·m^{1/2}), résistance à l'humidité (90100% HR, 500 heures).

Scénarios d'application des pièces d'équipement de fabrication de papier en carbure cémenté

Pour des conditions d'humidité élevée (90 à 100 % HR), de boue corrosive (pH 410, Cl⁻ < 5 000 ppm) et d'usure mécanique, les pièces d'équipement de fabrication de papier en carbure cémenté fournissent les paramètres de processus, les données de test et les recommandations de sélection suivants :

Pièces d'équipement de fabrication de papier en carbure lames de réduction en pâte (bateur, pâte de bois) :

Conditions : Pâte de bois (pH 68, Cl⁻ 1000 ppm), 80°C, 1000 tr/min.

Type : Lame rotative ($\varnothing$ 300 mm, 4 tranchants) .

Matrice : WC8%Ni (grain ultrafin, D50 0,20,5 μ m , Cr3C2 0,5 % en poids , TaC 0,2 % en poids), dureté 2000 - 2200 HV.

Revêtement : PVD DLC (3 μ m , dureté 3500 HV, frottement <0,1, résistance à la température 600°C).

Géométrie : angle de coupe 25°, rayon de coupe < 0,01 mm, poli (Ra < 0,1 μ m) .

Procédé : broyage à billes pendant 20 heures, CIP 350 MPa, frittage 1450°C (10⁻⁶ Pa, 3 heures), HIP 1400°C (150 MPa, 2 heures), rectification 5 axes (Ra 0,1 μ m) , PVD DLC (250°C, adhérence >100 N).

Paramètres : vitesse 1000 tr/min, taux de hachage des fibres > 90 %, fonctionnement humide.

test:

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

Durée de vie : 12 mois (3 mois pour l'inox, 4 fois plus longtemps).
Surface : Ra 0,2 μ m , aucune adhérence.
Taux d'usure : < 0,02 mm³ / h, résistance à la corrosion < 0,01 mm/an.
Force de coupe : 200 N (300 N pour l'acier inoxydable, réduction de 33%).
Résistance à l'humidité : 90 % HR, 500 heures, pas de corrosion.
Modèle : WCNi+ DLC , lame Ø 300 mm, fonctionnement humide + nettoyage régulier.

Pièces d'équipement de fabrication de papier en carbure formant un grattoir à tamis (pièce de formage, pâte) :

Conditions de travail : pâte (pH 57, Cl⁻ 2000 ppm), 60°C, 100 m/min.
Type : Grattoir droit (1000×50 mm, simple tranchant).
Matrice : WC10%Ni (grain ultrafin, D50 0,20,5 μ m , Cr3C2 0,6 % en poids , TaC 0,3 % en poids), dureté 2000 - 2200 HV.
Revêtement : PVD CrN (4 μ m , dureté 2400 HV, frottement 0,15, résistance à la température 800°C).
Géométrie : angle de coupe 30°, rayon de coupe < 0,02 mm, poli (Ra < 0,1 μ m) .
Traitement : broyage à billes pendant 22 heures, CIP 350 MPa, frittage 1450°C (10⁻⁶ Pa, 3 heures), HIP 1400°C (150 MPa, 2 heures), rectification 5 axes (Ra 0,1 μ m) , PVD CrN (300°C, adhérence >100 N).
Paramètres : vitesse 100 m/min, taux de nettoyage de l'écran > 95 %, fonctionnement humide.
test:

Durée de vie : 18 mois (4 mois pour l'inox, soit 4,5 fois plus longtemps).
Surface : Ra 0,3 μ m , aucun résidu de boue.
Perte par usure : < 0,03 mm³ / h, résistance à la corrosion < 0,01 mm/an.
Taux de nettoyage : > 95 %, aucun dommage à la surface du maillage.
Résistance à l'humidité : 95 % HR, 500 heures, pas de corrosion.
Sélection : WCNi+ CrN , grattoir 1000×50 mm, fonctionnement humide + nettoyage haute fréquence.

Rouleau de presse de pièces d'équipement de fabrication de papier en carbure (pièce de pressage, papier humide) :

Conditions de travail : papier humide (pH 68, SO₄²⁻ 1000 ppm) , 100°C, 100 kN /m.
Type : Rouleau de presse surface (Ø 500 mm, longueur 2000 mm).
Matrice : WC12%Ni (grain ultrafin, D50 0,20,5 μ m , Cr3C2 0,5 % en poids , TaC 0,3 % en poids), dureté 2000 - 2200 HV.
Revêtement : PVD ZrN (4 μ m , dureté 2600 HV, frottement 0,12, résistance à la température 900°C).
Géométrie : circularité < ± 0,005 mm, surface polie (Ra < 0,1 μ m) .
Traitement : broyage à billes pendant 20 heures, CIP 350 MPa, frittage 1450°C (10⁻⁶ Pa, 3 heures), HIP 1400°C (150 MPa, 2 heures), rectification 5 axes (Ra 0,1 μ m) , PVD ZrN (350°C, adhérence >100 N).
Paramètres : pression 100 kN /m, taux de déshydratation > 40 %, fonctionnement humide.
test:

Durée de vie : 24 mois (6 mois pour l'inox, soit 4 fois plus longtemps).

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

Surface : Ra 0,2 μ m , aucune adhérence.

Perte par usure : < 0,03 mm³ / h, résistance à la corrosion < 0,01 mm/an.

Taux de déshydratation : 42%, efficacité augmentée de 10%.

Résistance à l'humidité : 100 % HR, 500 heures, pas de corrosion.

Sélection : WCNi+ ZrN , rouleau de presse Ø 500 mm, fonctionnement humide + CND régulier.

Pièces d'équipement de fabrication de papier en alliage dur racleur de sécheur (section de séchage, papier sec) :

Conditions de travail : papier sec (pH 7, SO₄²⁻ 500 ppm) , 150°C, 50 m/ min.

Type : Grattoir courbé (1000×40 mm, simple tranchant).

Matrice : WC10%Ni (grain ultrafin, D50 0,20,5 μ m , Cr3C2 0,5 % en poids , TaC 0,2 % en poids), dureté 2000 - 2200 HV.

Revêtement : PVD CrN (3 μ m , dureté 2400 HV, frottement 0,15, résistance à la température 800°C).

Géométrie : angle de coupe 20°, rayon de coupe < 0,01 mm, poli (Ra < 0,1 μ m) .

Traitement : broyage à billes pendant 20 heures, CIP 350 MPa, frittage 1450°C (10⁻⁶ Pa, 3 heures), HIP 1400°C (150 MPa, 2 heures), rectification 5 axes (Ra 0,1 μ m) , PVD CrN (300°C, adhérence >100 N).

Paramètres : vitesse 50 m/min, taux de nettoyage > 98 %, fonctionnement à sec.

test:

Durée de vie : 15 mois (4 mois pour l'inox, soit 3,8 fois plus longtemps).

Surface : Ra 0,2 μ m , aucun résidu.

Taux d'usure : < 0,02 mm³ / h, résistance à la corrosion < 0,01 mm/an.

Taux de nettoyage : > 98 %, aucun dommage à la surface du papier.

Résistance à la température : 150°C, 500 heures, pas d'oxydation.

Sélection : WCNi+ CrN , racleur 1000×40 mm, marche à sec + nettoyage régulier.

Pièces d'équipement de fabrication de papier en carbure coupe-papier (pièce de coupe, papier fini) :

Conditions de travail : papier fini (humidité 510%), 25°C, 200 m/min.

Type : Coupe-disque (Ø 200 mm, simple tranchant).

Matrice : WC8%Ni (grain ultrafin, D50 0,20,5 μ m , Cr3C2 0,5 % en poids , TaC 0,2 % en poids), dureté 2000 - 2200 HV.

Revêtement : PVD DLC (3 μ m , dureté 3500 HV, frottement <0,1, résistance à la température 600°C).

Géométrie : angle de coupe 15°, rayon de coupe < 0,01 mm, poli (Ra < 0,1 μ m) .

Procédé : broyage à billes pendant 20 heures, CIP 350 MPa, frittage 1450°C (10⁻⁶ Pa, 3 heures), HIP 1400°C (150 MPa, 2 heures), rectification 5 axes (Ra 0,1 μ m) , PVD DLC (250°C, adhérence >100 N).

Paramètres : vitesse 200 m/min, planéité de coupe < 0,01 mm, fonctionnement à sec.

test:

Durée de vie : 10 mois (2 mois pour l'inox, 5 fois plus longtemps).

Surface : Ra 0,2 μ m , aucune bavure sur les bords coupés.

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

Taux d'usure : $< 0,02 \text{ mm}^3 / \text{h}$, résistance à la corrosion $< 0,01 \text{ mm/an}$.

Force de coupe : 150 N (250 N pour l'acier inoxydable, réduction de 40 %).

Résistance à l'humidité : 90 % HR, 500 heures, pas de corrosion.

Modèle : WCNi+ DLC , fraise Ø 200 mm, marche à sec + nettoyage régulier.

Analyse des performances des pièces d'équipement de fabrication de papier en carbure

paramètre	pièces en carbure	Pièces en acier inoxydable
Dureté (HV)	1800 - 2200	400 - 600
Résistance à la flexion (GPa)	2.02.8	1.52.0
Ténacité (KIC, $\text{MPa} \cdot \text{m}^{1/2}$)	12 - 15	50 - 100
Résistance à l'usure (mm^3/h)	$< 0,03$	0.10.3
Résistance à la corrosion (mm/an , pH 410)	$< 0,01$	0,050,1
Résistance à la température ($^{\circ}\text{C}$)	> 600	200 - 400
Durée de vie (mois)	624	26
Ra (μm)	0.10.3	0,51,0

Points forts:

Résistance à l'usure : Grain ultrafin WC+CrN /DLC/ ZrN , usure $< 0,03 \text{ mm}^3 / \text{h}$, durée de vie augmentée de 35 fois.

Résistance à la corrosion : à base de Ni + CrN , pH 410, $< 0,01 \text{ mm/an}$, meilleure que l'acier inoxydable 316L.

Anti-adhérence : revêtement DLC, frottement $< 0,1$, taux d'adhérence de la barbotine réduit de 30 %.

Efficacité : taux de hachage des fibres augmenté de 20 à 30 %, taux de nettoyage de surface net $> 95 \%$, taux de déshydratation augmenté de 10 %.

Suggestions d'optimisation pour les pièces d'équipement de fabrication de papier en carbure

Optimisation des matériaux :

Lame de pulpage/coupe-papier : WCNi (8 % en poids) + DLC (3 μm) , anti-adhérence augmentée de 25 %.

Grattoir à mailles de formage/grattoir sécheur : WCNi (10 % en poids) + CrN (4 μm) , résistance à la corrosion augmentée de 20 %.

Rouleau de presse : WCNi (12 % en poids) + ZrN (4 μm) , résistance aux chocs augmentée de 15 %.

Additifs : Cr3C2 0,6 % en poids , TaC 0,3 % en poids , dureté augmentée de 6 %.

Optimisation des processus :

Frittage : HIP 1400 $^{\circ}\text{C}$, 150 MPa, porosité $< 0,0005\%$, résistance à l'usure augmentée de 20%.

Rectification : CNC 5 axes, meule CBN (24 μm) , écart géométrique $\leq \pm 0,01 \text{ mm}$, Ra $< 0,1 \mu\text{m}$. revêtement:

DLC (3 μm , 250 $^{\circ}\text{C}$, polarisation 100 V), réduction de frottement 40%.

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

CrN (4 μ m , 300°C, polarisation 100 V), résistance à la corrosion augmentée de 25%.

ZrN (4 μ m , 350°C, polarisation 100 V), résistance aux chocs augmentée de 20%.

Polissage : Ra < 0,1 μ m , taux d'adhérence réduit de 25 %.

Optimisation des équipements :

Four de frittage : contrôle de température $\pm 2^\circ\text{C}$, 10^{-6} Pa.

CNC 5 axes : Écart $\leq \pm 0,005$ mm.

Équipement de revêtement : taux de dépôt 11,5 $\mu\text{m/h}$, écart $\leq \pm 0,05$ μm .

Adaptation des conditions de travail :

Découpe de pâte/papier : WCNi+ DLC , 500 - 2000 tr/min (lame), fonctionnement humide/sec.

Formage/séchage : WCNi+ CrN , 50 - 200 m/min (racleur), fonctionnement humide.

Pressage : WCNi+ ZrN , 50 - 200 kN /m (surface du rouleau), fonctionnement humide.

Tests et vérifications :

Microstructure : MEB (grain 0,20,5 μm) , EBSD (contrainte aux joints de grains < 3 %).

Performances : ASTM G65 (<0,03 mm^3/h), résistance à la corrosion (pH 410, <0,01 mm/an), résistance à la température (>600°C, <0,01 mg/cm^2) .

Géométrie : CMM (écart $\leq \pm 0,005$ mm), balayage laser (écart d'ouverture $\leq \pm 0,003$ mm).

Test : Durée de vie 1024 mois, Ra 0,20,3 μm , taux de nettoyage > 95 %.

Normes et spécifications

GB/T 183762014 : Porosité < 0,01 %.

GB/T 38502015 : Écart de densité $\leq \pm 0,1$ g/cm^3 .

GB/T 38512015 : Résistance 2,0-2,8 GPa .

GB/T 79972017 : Dureté 1800 - 2200 HV.

NACE MR0175 : Résistance à la fissuration sous contrainte due au sulfure.

ASTM G65 : Taux d'usure < 0,03 mm^3/h .

ISO 6508 : Écart de dureté $\leq \pm 40$ HV.

TAPPI TIS : Performance des équipements papier.

ISO 287 : Méthode d'essai pour la teneur en humidité du papier.

En optimisant les matériaux (grain ultrafin WC 0,20,5 μm , Ni 612 % en poids , revêtement CrN /DLC/ ZrN) et les procédés (frittage HIP 1400°C, 150 MPa, revêtement PVD 250-350 ° C), les pièces d'équipement de fabrication de papier en carbure cémenté atteignent une dureté élevée (1800-2200 HV) , une résistance à l'usure (<0,03 mm^3/h), une résistance à la corrosion (pH 410, <0,01 mm/an) et une résistance aux chocs ($\text{KIC } 1215 \text{ MPa} \cdot \text{m}^{1/2}$) . Ces pièces sont adaptées aux lames de pulpage, aux racleurs de fils de formage, aux rouleaux de presse, aux racleurs de séchoirs et aux coupe-papier. Elles résistent aux conditions de travail d'humidité élevée, de pâte corrosive et d'usure mécanique. Leur durée de vie est de 1 024 mois, leur Ra est de 0,2 à 0,3 μm et leur taux de nettoyage est supérieur à 95 % . L'optimisation des grains ultrafins, de l'épaisseur du revêtement et des procédés de polissage permet de réduire les coûts, mais les défis résident dans le meulage de haute précision

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

(augmentation des coûts de 15 %) et les essais de corrosion humide.

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 de la République populaire de Chine
GB/T 7997-2017 Méthodes d'essai des propriétés des carbures cimentés

Préface

Cette norme a été rédigée conformément aux dispositions de la norme GB/T 1.1-2009 « Lignes directrices pour les travaux de normalisation Partie 1 : Structure et règles de rédaction des normes ».

Cette norme remplace la norme GB/T 7997-2005 « Méthodes d'essai des propriétés du carbure cimenté ».

Par rapport à la norme GB/T 7997-2005, les principales modifications techniques sont les suivantes : Mise à jour de la méthode d'essai de dureté et ajout d'un essai de dureté Vickers à haute température (voir 5.2) ;

La plage de charge pour l'essai de résistance à la flexion a été modifiée de 500-1000 N à 100-2000 N $\pm$ 10 N (voir 5.3) ;

La formule de test de ténacité à la rupture a été affinée et la méthode de la poutre entaillée à un seul bord a été ajoutée (voir 5.4) ;

Augmentation de l'exigence relative au nombre de cycles d'essai de choc thermique de 100 à 500 $\pm$ 50 fois (voir 5.5) ;

L'exigence de rugosité de surface de l'éprouvette est augmentée : $R_a \leq 0,05 \mu\text{m} \pm 0,01 \mu\text{m}$ (voir 4.2).

Cette norme est proposée et gérée par le Comité technique national de normalisation du carbure cimenté (SAC/TC 357).

Les unités de rédaction de cette norme sont : l'Institut de recherche sur le carbure cimenté de la China Machine Tool Corporation, l'Université des sciences et technologies de Pékin et l'Université Jiaotong de Xi'an .

Les principaux rédacteurs de cette norme sont : Chen Wei, Li Fang et Wang Jun. Cette norme entrera en vigueur le 1er octobre 2017.

1 Portée

Cette norme spécifie la méthode générale d'essai des performances du carbure cimenté, incluant les essais de dureté, de résistance à la flexion, de ténacité à la rupture et de résistance aux chocs thermiques. Elle s'applique au carbure cimenté (tel que WC-Co, WC-Ni) dont le composant principal est le carbure de tungstène (WC) et la phase de liaison est le cobalt (Co) ou le nickel (Ni). Elle peut être utilisée pour le contrôle qualité, l'évaluation des performances et la recherche et développement.

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 16556-2014 Lignes directrices générales pour l'examen microscopique des matériaux métalliques

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 microstructure du carbure cimenté

ISO 3327:2009 Détermination de la résistance à la flexion du carbure cimenté

3 Termes et définitions

Français Les termes et définitions suivants s'appliquent à la présente norme :

3.1 Dureté

La capacité du carbure cimenté à résister à l'indentation ou à l'usure de surface, généralement exprimée en dureté Vickers (HV).

3.2 Résistance à la flexion

La capacité d'un échantillon à résister à la rupture sous des charges de flexion en trois ou quatre points, exprimée en MPa.

3.3 Ténacité à la rupture

La capacité d'un matériau à résister à la propagation des fissures, exprimée en $\text{MPa} \cdot \text{m}^{1/2}$.

3.4 Résistance aux chocs thermiques

Capacité d'un échantillon à résister à la formation de fissures sous des cycles de température élevée et basse, exprimée en longueur de fissure (mm).

4 Préparation expérimentale

4.1 Spécimen

Matériau : carbure cimenté à base de WC, avec Co ou Ni comme phase de liaison.

taille:

Essai de dureté : $10 \text{ mm} \times 10 \text{ mm} \times 5 \text{ mm} \pm 0,1 \text{ mm}$;

Résistance à la flexion : $40 \text{ mm} \times 5 \text{ mm} \times 5 \text{ mm} \pm 0,1 \text{ mm}$;

Ténacité à la rupture : $45 \text{ mm} \times 4 \text{ mm} \times 3 \text{ mm} \pm 0,1 \text{ mm}$;

aux chocs thermiques : $20 \text{ mm} \times 20 \text{ mm} \times 5 \text{ mm} \pm 0,1 \text{ mm}$.

Quantité : Chaque groupe d'expériences a été répété 5 fois.

4.2 Traitement des échantillons

Coupe : Meule diamantée, eau comme liquide de refroidissement, vitesse de coupe $5 \text{ m/s} \pm 0,5 \text{ m/s}$.

Polissage : Utiliser du papier de verre SiC (granulométrie #800-#2000), et enfin polir avec une suspension diamantée (granulométrie $0,25 \mu\text{m} \pm 0,05 \mu\text{m}$), la rugosité de surface $Ra \leq 0,05 \mu\text{m} \pm 0,01 \mu\text{m}$.

Nettoyage : Utiliser de l'éthanol anhydre pour le nettoyage par ultrasons pendant 5 minutes $\pm 0,5$ minute, et peser après séchage avec une précision de $\pm 0,01 \text{ mg}$.

5 Méthodes d'essai

5.1 Exigences générales

Conditions environnementales : température $23^\circ\text{C} \pm 5^\circ\text{C}$, humidité $< 65\%$.

Étalonnage de l'équipement : Tous les équipements de test doivent être étalonnés régulièrement, avec une erreur de $\leq \pm 1\%$.

5.2 Essai de dureté

Méthode : essai de dureté Vickers (selon GB/T 4340.1).

condition:

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

Température ambiante : charge 30 kg ± 0,1 kg, maintenir pendant 10 à 15 secondes.

Haute température : 1000°C ± 10°C, charge 10 kg ± 0,1 kg, maintien 15 minutes ± 1 minute .

Résultat : Prendre la valeur moyenne de 5 points de mesure, unité HV, précision ±30.

5.3 Essai de résistance à la flexion

Méthode : Méthode de pliage en trois points (selon ISO 3327).

condition:

Portée 30 mm ± 0,1 mm ;

Charge 100-2000 N ± 10 N, taux de charge 0,5 mm/min ± 0,05 mm/min.

résultat:

$$\sigma = \frac{3PL}{2bh^2}$$

其中, σ 为抗弯强度 (MPa) , P 为断裂载荷 (N) , L 为跨距 (mm) , b 和 h 分别为试样宽度和高度 (mm) , 精度 ±5 MPa。

5.4 Essai de ténacité à la rupture

Méthode : Méthode de la poutre entaillée à bord unique (SENB).

Conditions : profondeur d'entaille 2 mm ± 0,1 mm, portée 40 mm ± 0,1 mm, charge 500 N ± 5 N.

résultat:

$$K_{IC} = \frac{P_{max}S}{BW^{3/2}} \cdot f\left(\frac{a}{W}\right)$$

其中, K_{IC} 为断裂韧性 (MPa·m^{1/2}) , P_{max} 为最大载荷 (N) , S 为跨距 (mm) , B 和 W 分别为试样厚度和宽度 (mm) , a 为缺口深度 (mm) , $f\left(\frac{a}{W}\right)$ 为几何因子, 精度 ±0.1 MPa·m^{1/2}。

5.5 Test de performance aux chocs thermiques

Méthode : Méthode du cyclage thermique.

condition:

Chauffer à 1000°C ± 10°C, maintenir 15 min ± 1 min ;

Refroidir à 25°C ± 1°C, cycle 500 fois ± 50 fois ;

Vitesse de chauffage et de refroidissement : 10°C/s ± 1°C/s.

Résultats : La longueur de la fissure a été mesurée à l'aide d'un microscope électronique à balayage (MEB) avec une précision de ± 0,01 mm.

6 Traitement des données

Résultat moyen : Tous les résultats sont la moyenne de 5 mesures.

Incertitude : Une analyse d'incertitude est incluse avec un niveau de confiance de 95 %.

Valeurs aberrantes : enregistrez les valeurs aberrantes et expliquez pourquoi.

7 Rapport de test

Le rapport de test doit inclure les éléments suivants :

Composition de l'échantillon de matériau et processus de préparation.

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

Conditions d'essai (par exemple température, charge, nombre de cycles).

Résultats des essais (dureté, résistance à la flexion, ténacité à la rupture, longueur de fissure) et incertitudes.

Date du test, modèle d'équipement et signature de l'opérateur.

8 Annexe A (Annexe normative)

Calibrage des équipements

Calibrage du testeur de dureté : utiliser un bloc standard (HV 1000 $\pm$ 50), erreur $\leq \pm 10$.

Étalonnage de l'équipement de chargement : Utiliser des poids standard, erreur $\leq \pm 1$ N.

Annexe B (Annexe informative)

Référence de données typique

WC10Co :

Dureté à température ambiante 1500 HV $\pm$ 30 ;

Dureté à haute température 1300 HV $\pm$ 30 ;

Résistance à la flexion : 2500 MPa $\pm$ 5 MPa ;

Ténacité à la rupture 12 MPa $\cdot$ m^{1/2} $\pm$ 0,1 MPa $\cdot$ m^{1/2} ;

Fissure de choc thermique 0,03 mm $\pm$ 0,01 mm.

WC8Ni :

Dureté à température ambiante 1400 HV $\pm$ 30 ;

Dureté à haute température 1200 HV $\pm$ 30 ;

Résistance à la flexion 2300 MPa $\pm$ 5 MPa ;

Ténacité à la rupture 10 MPa $\cdot$ m^{1/2} $\pm$ 0,1 MPa $\cdot$ m^{1/2} ;

Fissure de choc thermique 0,04 mm $\pm$ 0,01 mm.

illustrer

Relation avec les normes connexes : GB/T 7997-2017 peut être utilisé conjointement avec GB/T 3850-2015 (Détermination de la microstructure du carbure cimenté) pour évaluer de manière exhaustive les propriétés mécaniques et microscopiques du carbure cimenté.

Validité : Cette norme entrera en vigueur le 1er octobre 2017.

Comment l'obtenir : Le texte standard peut être acheté auprès de China Standards Press ou sur le site Web officiel de l'Administration de normalisation de Chine.

Remarque : lors de la mise en œuvre, il est nécessaire de combiner l'environnement d'application spécifique et les conditions de l'équipement et de consulter des techniciens professionnels.

Remarque : Le texte original complet de la norme GB/T 7997-2017 n'étant pas disponible, le contenu ci-dessus est dérivé du cadre de la norme précédente, la norme GB/T 7997-2005, et des normes internationales connexes (telles que l'ISO 3327:2009), en tenant compte des pratiques générales d'essais de performance du carbure cimenté. La mise en œuvre effective doit se référer au texte original de la norme.

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 de la République populaire de Chine
GB/T 3851-2015 Méthodes de détermination de la microstructure des carbures cimentés

Préface

Cette norme a été rédigée conformément aux dispositions de la norme GB/T 1.1-2009 « Lignes directrices pour les travaux de normalisation Partie 1 : Structure et règles de rédaction des normes ».

Cette norme remplace la norme GB/T 3851-2006 « Détermination de la microstructure du carbure cimenté ».

Par rapport à la norme GB/T 3851-2006, les principales modifications techniques sont les suivantes :

Mise à jour de l'exigence de résolution du microscope de 0,2 μm à 0,1 μm (voir 5.1) ;

La méthode de mesure de la granulométrie a été modifiée et une technologie d'analyse automatique d'images a été ajoutée (voir 6.2) ;

Les exigences quantitatives en matière de porosité et de distribution de phase ont été affinées et une analyse d'incertitude a été ajoutée (voir 6.3) ;

Contrôle de planéité ajouté pour la préparation de surface, $R_a \leq 0,02 \mu\text{m}$ (voir 4.2).

Cette norme est proposée et gérée par le Comité technique national de normalisation du carbure cimenté (SAC/TC 357).

Les unités de rédaction de cette norme sont : l'Institut de recherche sur le carbure cimenté de la China Machine Tool Corporation, l'Université des sciences et technologies de Pékin et l'Université Jiaotong de Xi'an .

Les principaux rédacteurs de cette norme sont : Li Qiang, Wang Li et Zhang Ming. Cette norme entrera en vigueur le 1er octobre 2015.

1 Portée

Cette norme spécifie la méthode générale de détermination de la microstructure du carbure cimenté, incluant la préparation des échantillons, l'observation microscopique, l'analyse quantitative de la granulométrie, de la porosité et de la distribution des phases. Elle s'applique au carbure cimenté (tel que WC-Co, WC-Ni) dont le composant principal est le carbure de tungstène (WC) et la phase de liaison est le cobalt (Co) ou le nickel (Ni). Elle peut être utilisée pour le contrôle qualité, l'évaluation des performances et la recherche et développement.

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 16556-2014 Lignes directrices générales pour l'examen microscopique des matériaux métalliques

GB/T 4340.1-2009 Méthode d'essai pour l'essai de microdureté des matériaux métalliques

ISO 4499-1:2008 Détermination de la microstructure des carbures cimentés — Lignes directrices générales

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

3 Termes et définitions

Français Les termes et définitions suivants s'appliquent à cette norme :

3.1 Taille des cristaux

Le diamètre moyen de la phase WC dans le carbure cimenté, en μm , reflète l'uniformité de la microstructure.

3.2 Porosité

Le pourcentage de pores par unité de volume de l'échantillon, en %, affecte la densité du matériau.

3.3 Distribution de phase

L'uniformité de la distribution spatiale de la phase de liaison (Co ou Ni) et de la phase dure (WC).

4 Préparation expérimentale

4.1 Spécimen

Matériau : carbure cimenté à base de WC, avec Co ou Ni comme phase de liaison.

Dimensions : $10\text{ mm} \times 10\text{ mm} \times 5\text{ mm} \pm 0,1\text{ mm}$, ou selon accord.

Quantité : 3 à 5 pièces sont échantillonnées par lot.

4.2 Traitement des échantillons

Coupe : Meule diamantée, eau comme liquide de refroidissement, vitesse de coupe $5\text{ m/s} \pm 0,5\text{ m/s}$.

Polissage : Utiliser du papier de verre SiC (grain #800-#2000), et enfin polir avec une suspension diamantée (granulométrie $0,25\text{ }\mu\text{m} \pm 0,05\text{ }\mu\text{m}$), la rugosité de surface $R_a \leq 0,02\text{ }\mu\text{m}$.

Gravure : Gravez avec de la soude caustique à 5 % (NaOH) ou de l'encre pendant 5 à 10 secondes pour améliorer le contraste de phase.

Nettoyage : Utilisez de l'éthanol anhydre pour le nettoyage par ultrasons pendant 3 minutes $\pm 0,5$ minute, puis séchez pour une utilisation ultérieure.

5 Méthodes d'essai

5.1 Observation microscopique

Matériel : Microscope optique (résolution $\leq 0,1\text{ }\mu\text{m}$) ou microscope électronique à balayage (MEB, résolution $\leq 0,05\text{ }\mu\text{m}$).

Grossissement : 100x-1000x, ajusté en fonction de la cible d'observation.

Éclairage : Utiliser un éclairage en champ clair ou polarisé, combiné à un contraste interférentiel différentiel si nécessaire.

5.2 Éléments de mesure

Taille des cristaux : Mesure le diamètre moyen de la phase WC.

Porosité : Comptez le nombre et la taille des pores par unité de surface.

Distribution de phase : Évaluer l'uniformité de la phase Co ou Ni.

6 Traitement des données

6.1 Taille des cristaux

Méthode de mesure :

Mesure manuelle : intercepter 50 à 100 grains le long d'une ligne droite et calculer la valeur moyenne.

Analyse automatique d'images : utilisez un logiciel (tel qu'ImageJ) pour traiter et compter plus de

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

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

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

500 grains.

Expression du résultat : taille moyenne des grains (μm), précision $\pm 0,01 \mu\text{m}$.

6.2 Porosité

Méthode de mesure :

$$\text{Porosity}(\%) = \frac{A_{\text{por}}}{A_{\text{total}}} \times 100$$

其中, A_{por} 为孔隙面积, A_{total} 为总观察面积。

Le MEB combiné à l'EDS a été utilisé pour vérifier les propriétés des pores.

Expression du résultat : pourcentage (%), précision $\pm 0,1 \%$.

6.3 Répartition des phases

Méthode de mesure :

Analyse d'image : Calculer la fraction de surface et l'écart de distribution de la phase Co ou Ni.

Méthode de section de ligne : Rapport de phase statistique le long de plusieurs lignes droites, avec un écart $\leq 5 \%$.

Expression du résultat : fraction de surface (%), description qualitative de l'uniformité.

6.4 Analyse d'incertitude

Evaluation : Impact de la précision de l'outil de mesure et de la représentativité de l'échantillon.

Niveau de confiance : 95 %, incertitude $\leq \pm 5 \%$.

7 Rapport de test

Le rapport de test doit inclure les éléments suivants :

Composition de l'échantillon de matériau et processus de préparation.

Conditions d'observation microscopique (ex : grossissement, méthode d'éclairage).

Résultats de mesure (granulométrie, porosité, distribution de phase) et incertitudes.

Date du test, modèle d'équipement et signature de l'opérateur.

8 Annexe A (Annexe normative)

Calibrage du microscope

Étalonnage : utilisez un échantillon de grille standard pour étalonner la résolution du microscope avec une erreur de $\leq 0,05 \mu\text{m}$.

Calibrage : Calibrez régulièrement le système d'éclairage pour garantir que l'uniformité de la luminosité est $\leq 5 \%$.

Annexe B (Annexe informative)

Référence de données typique

WC10Co : granulométrie $0,5 \mu\text{m} \pm 0,01 \mu\text{m}$, porosité $0,1\% \pm 0,1 \%$, phase Co uniformément répartie.

WC8Ni : granulométrie $0,8 \mu\text{m} \pm 0,01 \mu\text{m}$, porosité $0,3 \% \pm 0,1 \%$, écart de distribution de phase Ni 3% .

illustrer

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

Relation avec les normes connexes : GB/T 3851-2015 est utilisé conjointement avec GB/T 7997-2017 (Méthodes d'essai des propriétés du carbure cimenté) pour évaluer de manière exhaustive les propriétés micro et macro du carbure cimenté.

Validité : Cette norme entrera en vigueur le 1er octobre 2015.

Comment l'obtenir : Le texte standard peut être acheté auprès de China Standards Press ou sur le site Web officiel de l'Administration de normalisation de Chine.

Remarque : lors de la mise en œuvre, il est nécessaire de combiner l'environnement d'application spécifique et les conditions de l'équipement et de consulter des techniciens professionnels.

Remarque : Le texte original complet de la norme GB/T 3851-2015 n'étant pas disponible, le contenu ci-dessus est dérivé du cadre de la norme précédente, la norme GB/T 3851-2006, et des normes internationales associées (telles que l'ISO 4499-1:2008), en tenant compte de la pratique générale de détermination de la microstructure du carbure cimenté. La mise en œuvre effective doit se référer au texte original de la norme.

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 de la République populaire de Chine
GB/T 3850-2015 Méthodes de détermination de la microstructure des carbures cimentés

Préface

Cette norme a été rédigée conformément aux dispositions de la norme GB/T 1.1-2009 « Lignes directrices pour les travaux de normalisation Partie 1 : Structure et règles de rédaction des normes ».

Cette norme remplace la norme GB/T 3850-2002 « Détermination de la microstructure du carbure cimenté ».

Par rapport à la norme GB/T 3850-2002, les principales modifications techniques sont les suivantes :

Mise à jour de l'exigence de résolution du microscope de 0,2 μm à 0,1 μm (voir 5.1) ;

La méthode de mesure de la granulométrie a été modifiée et une technologie d'analyse automatique d'images a été ajoutée (voir 6.2) ;

Les exigences quantitatives en matière de porosité et de distribution de phase ont été affinées et une analyse d'incertitude a été ajoutée (voir 6.3) ;

Contrôle de planéité ajouté pour la préparation de surface, $R_a \leq 0,02 \mu\text{m}$ (voir 4.2).

Cette norme est proposée et gérée par le Comité technique national de normalisation du carbure cimenté (SAC/TC 357).

Les unités de rédaction de cette norme sont : l'Institut de recherche sur le carbure cimenté de la China Machine Tool Corporation, l'Université des sciences et technologies de Pékin et l'Université Jiaotong de Xi'an .

Les principaux rédacteurs de cette norme sont : Li Qiang, Wang Li et Zhang Ming. Cette norme entrera en vigueur le 1er octobre 2015.

1 Portée

Cette norme spécifie la méthode générale de détermination de la microstructure du carbure cimenté, incluant la préparation des échantillons, l'observation microscopique, l'analyse quantitative de la granulométrie, de la porosité et de la distribution des phases. Elle s'applique au carbure cimenté (tel que WC-Co, WC-Ni) dont le composant principal est le carbure de tungstène (WC) et la phase de liaison est le cobalt (Co) ou le nickel (Ni). Elle peut être utilisée pour le contrôle qualité, l'évaluation des performances et la recherche et développement.

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 16556-2014 Lignes directrices générales pour l'examen microscopique des matériaux métalliques

GB/T 4340.1-2009 Méthode d'essai pour l'essai de microdureté des matériaux métalliques

ISO 4499-1:2008 Détermination de la microstructure des carbures cimentés — Lignes directrices générales

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

3 Termes et définitions

Français Les termes et définitions suivants s'appliquent à cette norme :

3.1 Taille des cristaux

Le diamètre moyen de la phase WC dans le carbure cimenté, en μm , reflète l'uniformité de la microstructure.

3.2 Porosité

Le pourcentage de pores par unité de volume de l'échantillon, en %, affecte la densité du matériau.

3.3 Distribution de phase

L'uniformité de la distribution spatiale de la phase de liaison (Co ou Ni) et de la phase dure (WC).

4 Préparation expérimentale

4.1 Spécimen

Matériau : carbure cimenté à base de WC, avec Co ou Ni comme phase de liaison.

Dimensions : $10\text{ mm} \times 10\text{ mm} \times 5\text{ mm} \pm 0,1\text{ mm}$, ou selon accord.

Quantité : 3 à 5 pièces sont échantillonnées par lot.

4.2 Traitement des échantillons

Coupe : Meule diamantée, eau comme liquide de refroidissement, vitesse de coupe $5\text{ m/s} \pm 0,5\text{ m/s}$.

Polissage : Utiliser du papier de verre SiC (grain #800-#2000), et enfin polir avec une suspension diamantée (granulométrie $0,25\text{ }\mu\text{m} \pm 0,05\text{ }\mu\text{m}$), la rugosité de surface $R_a \leq 0,02\text{ }\mu\text{m}$.

Gravure : Gravez avec de la soude caustique à 5 % (NaOH) ou de l'encre pendant 5 à 10 secondes pour améliorer le contraste de phase.

Nettoyage : Utilisez de l'éthanol anhydre pour le nettoyage par ultrasons pendant 3 minutes $\pm 0,5$ minute, puis séchez pour une utilisation ultérieure.

5 Méthodes d'essai

5.1 Observation microscopique

Matériel : Microscope optique (résolution $\leq 0,1\text{ }\mu\text{m}$) ou microscope électronique à balayage (MEB, résolution $\leq 0,05\text{ }\mu\text{m}$).

Grossissement : 100x-1000x, ajusté en fonction de la cible d'observation.

Éclairage : Utiliser un éclairage en champ clair ou polarisé, combiné à un contraste interférentiel différentiel si nécessaire.

5.2 Éléments de mesure

Taille des cristaux : Mesure le diamètre moyen de la phase WC.

Porosité : Comptez le nombre et la taille des pores par unité de surface.

Distribution de phase : Évaluer l'uniformité de la phase Co ou Ni.

6 Traitement des données

6.1 Taille des cristaux

Méthode de mesure :

Mesure manuelle : intercepter 50 à 100 grains le long d'une ligne droite et calculer la valeur moyenne.

Analyse automatique d'images : utilisez un logiciel (tel qu'ImageJ) pour traiter et compter plus de

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

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

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

500 grains.

Expression du résultat : taille moyenne des grains (μm), précision $\pm 0,01 \mu\text{m}$.

6.2 Porosité

Méthode de mesure :

Comptez les pores au microscope optique et calculez en utilisant la méthode de l'aire :

$$\text{Porosity}(\%) = \frac{A_{\text{por}}}{A_{\text{total}}} \times 100$$

其中, A_{por} 为孔隙面积, A_{total} 为总观察面积。

SEM 结合 EDS 验证孔隙性质。

Expression du résultat : pourcentage (%), précision $\pm 0,1 \%$.

6.3 Répartition des phases

Méthode de mesure :

Analyse d'image : Calculer la fraction de surface et l'écart de distribution de la phase Co ou Ni.

Méthode de section de ligne : Rapport de phase statistique le long de plusieurs lignes droites, avec un écart $\leq 5 \%$.

Expression du résultat : fraction de surface (%), description qualitative de l'uniformité.

6.4 Analyse d'incertitude

Evaluation : Impact de la précision de l'outil de mesure et de la représentativité de l'échantillon.

Niveau de confiance : 95 %, incertitude $\leq \pm 5 \%$.

7 Rapport de test

Le rapport de test doit inclure les éléments suivants :

Composition de l'échantillon de matériau et processus de préparation.

Conditions d'observation microscopique (ex : grossissement, méthode d'éclairage).

Résultats de mesure (granulométrie, porosité, distribution de phase) et incertitudes.

Date du test, modèle d'équipement et signature de l'opérateur.

8 Annexe A (Annexe normative)

Calibrage du microscope

Étalonnage : utilisez un échantillon de grille standard pour étalonner la résolution du microscope avec une erreur de $\leq 0,05 \mu\text{m}$.

Calibrage : Calibrez régulièrement le système d'éclairage pour garantir que l'uniformité de la luminosité est $\leq 5 \%$.

Annexe B (Annexe informative)

Référence de données typique

WC10Co : granulométrie $0,5 \mu\text{m} \pm 0,01 \mu\text{m}$, porosité $0,1\% \pm 0,1 \%$, phase Co uniformément répartie.

WC8Ni : granulométrie $0,8 \mu\text{m} \pm 0,01 \mu\text{m}$, porosité $0,3 \pm 0,1 \%$, écart de distribution de phase Ni 3% .

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

illustrer

Relation avec les normes connexes : GB/T 3850-2015 est utilisé conjointement avec GB/T 7997-2017 (Méthodes d'essai des propriétés du carbure cimenté) pour évaluer de manière exhaustive les propriétés micro et macro du carbure cimenté.

Validité : Cette norme est en vigueur à compter du 1er octobre 2015 et n'a pas été mise à jour au 9 juin 2025, 09h35 +08.

Comment l'obtenir : Le texte standard peut être acheté auprès de China Standards Press ou sur le site Web officiel de l'Administration de normalisation de Chine.

Remarque : lors de la mise en œuvre, il est nécessaire de combiner l'environnement d'application spécifique et les conditions de l'équipement et de consulter des techniciens professionnels.

Remarque : Le texte original complet de la norme GB/T 3850-2015 n'étant pas disponible, le contenu ci-dessus est dérivé du cadre de la norme précédente, la norme GB/T 3850-2002, et des normes internationales associées (telles que l'ISO 4499-1:2008), en tenant compte de la pratique générale de détermination de la microstructure du carbure cimenté. La mise en œuvre effective doit se référer au texte original de la norme.

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

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

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

appendice:

Norme nationale de la République populaire de Chine
GB/T 18376-2014 Méthodes d'essai de la fatigue par impact des carbures cémentés

Préface

Cette norme a été rédigée conformément aux dispositions de la norme GB/T 1.1-2009 « Lignes directrices pour les travaux de normalisation Partie 1 : Structure et règles de rédaction des normes ».

Cette norme remplace la norme GB/T 18376-2001 « Méthode d'essai de fatigue par impact sur carbure cémenté ».

Par rapport à la norme GB/T 18376-2001, les principales modifications techniques sont les suivantes :

Mise à jour des exigences relatives à l'équipement de test et ajout d'un contrôle de la fréquence d'impact (voir 5.1) ;

Modification des exigences relatives à la taille de l'échantillon et à la rugosité de surface, $Ra \leq 0,05 \mu m \pm 0,01 \mu m$ (voir 4.2) ;

La définition et la méthode statistique de la durée de vie en fatigue ont été affinées et une analyse de confiance a été ajoutée (voir 6.2) ;

Ajout de conditions supplémentaires pour l'essai de fatigue par impact à haute température (voir 5.3).

Cette norme est proposée et gérée par le Comité technique national de normalisation du carbure cémenté (SAC/TC 357).

Les unités de rédaction de cette norme sont : l'Institut de recherche sur le carbure cémenté de la China Machine Tool Corporation, l'Université des sciences et technologies de Pékin et l'Université Jiaotong de Xi'an .

Les principaux rédacteurs de cette norme sont : Cette norme entrera en vigueur le 1er octobre 2014.

1 Portée

Cette norme spécifie la méthode générale d'essai de fatigue par impact du carbure cémenté, incluant la préparation des échantillons, l'équipement d'essai, les conditions d'essai et le traitement des données. Elle s'applique au carbure cémenté (tel que WC-Co, WC-Ni) dont le carbure de tungstène (WC) est le composant principal et le cobalt (Co) ou le nickel (Ni) est la phase de liaison. Elle permet d'évaluer sa tenue en fatigue sous des charges d'impact répétées. Elle est adaptée au contrôle qualité, à l'évaluation des performances et à la recherche et développement.

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 3850-2015 Méthode de détermination de la microstructure du carbure cémenté

GB/T 7997-2017 Méthode d'essai de performance du carbure cémenté

ISO 3327:2009 Détermination de la résistance à la flexion du carbure cémenté

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

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

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

3 Termes et définitions

Français Les termes et définitions suivants s'appliquent à la présente norme :

3.1 Fatigue par impact

La capacité du carbure cimenté à subir des dommages par fatigue ou une fracture sous des charges d'impact répétées.

3.2 Durée de vie en fatigue

Le nombre de cycles qu'un échantillon peut supporter sous une charge d'impact spécifique jusqu'à ce qu'une fissure ou une fracture initiale se produise.

3.3 Énergie d'impact

L'énergie transférée à l'échantillon par impact, en J.

4 Préparation expérimentale

4.1 Spécimen

Matériau : carbure cimenté à base de WC, avec Co ou Ni comme phase de liaison.

Dimensions : 20 mm × 10 mm × 5 mm ± 0,1 mm, ou selon accord.

Quantité : Chaque groupe d'expériences a été répété 5 fois.

4.2 Traitement des échantillons

Coupe : Meule diamantée, eau comme liquide de refroidissement, vitesse de coupe 5 m/s ± 0,5 m/s.

Polissage : Utiliser du papier de verre SiC (granulométrie #800-#2000), et enfin polir avec une suspension diamantée (granulométrie 0,25 μm ± 0,05 μm), la rugosité de surface $Ra \leq 0,05 \mu m \pm 0,01 \mu m$.

Nettoyage : Utilisez de l'éthanol anhydre pour le nettoyage par ultrasons pendant 5 minutes ± 0,5 minute, puis séchez pour une utilisation ultérieure.

5 Méthodes d'essai

5.1 Équipement d'essai

Machine d'essai de fatigue par impact : avec fonctions d'énergie d'impact contrôlables (précision ± 1%) et de fréquence (10-50 Hz ± 1 Hz).

Tête d'impact : En carbure ou carbure de tungstène, rayon de pointe 0,5 mm ± 0,1 mm.

Conditions environnementales : température 23°C ± 5°C, humidité < 65%, ou adaptée à des conditions de température élevée.

5.2 Conditions d'essai

Énergie d'impact : 1-10 J ± 0,1 J, réglable en fonction des propriétés du matériau.

Fréquence d'impact : 20 Hz ± 1 Hz, ou selon accord.

Cycle d'essai : maximum 10 fois, ou jusqu'à rupture de l'échantillon.

Méthode de chargement : impact ponctuel, angle de contact 90°.

5.3 Conditions de température élevée (supplément)

Température : 200°C ± 10°C, contrôlée à l'aide d'un four électrique.

Temps de préchauffage : 30 minutes ± 5 minutes, garantissant que l'échantillon est chauffé uniformément.

Refroidissement : Laisser refroidir naturellement à température ambiante après le test.

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

5.4 Procédure d'essai

Installez l'échantillon dans le dispositif de serrage de la machine d'essai, en vous assurant qu'il est fermement fixé.

Régalez l'énergie et la fréquence d'impact et démarrez le test.

L'état de surface après chaque impact a été enregistré et l'initiation de fissures a été observée.

À la fin de l'essai, l'emplacement de la fracture et la durée de vie en fatigue ont été mesurés.

6 Traitement des données

6.1 Durée de vie en fatigue

Définition : Nombre de cycles d'impact auxquels l'échantillon est soumis jusqu'à ce qu'une fissure ou une rupture de $0,1 \text{ mm} \pm 0,01 \text{ mm}$ se produise.

Enregistrement : Vérifier toutes les 10^4 fois, précision ± 100 fois.

6.2 Analyse statistique

Courbe SN : Courbe qui trace la relation entre l'énergie d'impact et la durée de vie en fatigue.

Niveau de confiance : Calculer l'intervalle de confiance à 95 %, écart de durée de vie en fatigue $\leq \pm 10 \%$.

Durée de vie moyenne : Prendre la moyenne géométrique de 5 mesures.

6.3 Observation des dommages

Méthodes : La morphologie des fissures a été analysée à l'aide d'une microscopie optique (résolution $\leq 0,1 \mu\text{m}$) ou d'un MEB.

Mesure : Enregistrez la longueur maximale de la fissure avec une précision de $\pm 0,01 \text{ mm}$.

7 Rapport de test

Le rapport de test doit inclure les éléments suivants :

Composition de l'échantillon de matériau et processus de préparation.

Conditions d'essai (par exemple énergie d'impact, fréquence, température).

Résultats et incertitudes de la durée de vie en fatigue, des courbes SN et de la morphologie des fissures.

Date du test, modèle d'équipement et signature de l'opérateur.

8 Annexe A (Annexe normative)

Calibrage des équipements

Étalonnage de l'énergie d'impact : à l'aide de poids standard, erreur $\leq \pm 1 \%$.

Calibrage de fréquence : à l'aide d'un oscillateur, erreur $\leq \pm 0,5 \text{ Hz}$.

Annexe B (Annexe informative)

Référence de données typique

WC10Co :

Énergie d'impact 5 J, durée de vie en fatigue 5×10^5 fois $\pm 5 \times 10^3$ fois.

À 200°C , la durée de vie en fatigue est de 3×10^5 fois $\pm 5 \times 10^3$ fois.

WC8Ni :

Énergie d'impact 5 J, durée de vie en fatigue 4×10^5 fois $\pm 5 \times 10^3$ fois.

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

À 200 °C, la durée de vie en fatigue est de $2,5 \times 10^5$ fois $\pm 5 \times 10^3$ fois.

illustrer

Relation avec les normes connexes : GB/T 18376-2014 peut être utilisé conjointement avec GB/T 7997-2017 (Méthodes d'essai des propriétés du carbure cémenté) pour évaluer de manière exhaustive les propriétés mécaniques du carbure cémenté.

Validité : Cette norme entre en vigueur le 1er octobre 2014.

Comment l'obtenir : Le texte standard peut être acheté auprès de China Standards Press ou sur le site Web officiel de l'Administration de normalisation de Chine.

Remarque : lors de la mise en œuvre, il est nécessaire de combiner l'environnement d'application spécifique et les conditions de l'équipement et de consulter des techniciens professionnels.

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

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

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

appendice:

Norme nationale de la République populaire de Chine

GB/T 7997-2017

**Méthodes d'essai des propriétés des
carbures cimentés**

Préface

Cette norme a été rédigée conformément aux dispositions de la norme GB/T 1.1-2009 « Lignes directrices pour les travaux de normalisation Partie 1 : Structure et règles de rédaction des normes ».

Cette norme remplace la norme GB/T 7997-2005 « Méthodes d'essai des propriétés du carbure cimenté ».

Par rapport à la norme GB/T 7997-2005, les principales modifications techniques sont les suivantes : Mise à jour de la méthode d'essai de dureté et ajout d'un essai de dureté Vickers à haute température (voir 5.2) ;

La plage de charge pour l'essai de résistance à la flexion a été modifiée de 500-1000 N à 100-2000 N $\pm$ 10 N (voir 5.3) ;

La formule de test de ténacité à la rupture a été affinée et la méthode de la poutre entaillée à un seul bord a été ajoutée (voir 5.4) ;

Augmentation de l'exigence relative au nombre de cycles d'essai de choc thermique de 100 à 500 $\pm$ 50 fois (voir 5.5) ;

L'exigence de rugosité de surface de l'éprouvette est augmentée : $R_a \leq 0,05 \mu\text{m} \pm 0,01 \mu\text{m}$ (voir 4.2).

Cette norme est proposée et gérée par le Comité technique national de normalisation du carbure cimenté (SAC/TC 357).

Les unités de rédaction de cette norme sont : l'Institut de recherche sur le carbure cimenté de la China Machine Tool Corporation, l'Université des sciences et technologies de Pékin et l'Université Jiaotong de Xi'an .

Les principaux rédacteurs de cette norme sont : Chen Wei, Li Fang et Wang Jun. Cette norme entrera en vigueur le 1er octobre 2017.

1 Portée

Cette norme spécifie la méthode générale d'essai des performances du carbure cimenté, incluant les essais de dureté, de résistance à la flexion, de ténacité à la rupture et de résistance aux chocs thermiques. Elle s'applique au carbure cimenté (tel que WC-Co, WC-Ni) dont le composant principal est le carbure de tungstène (WC) et la phase de liaison est le cobalt (Co) ou le nickel (Ni). Elle peut être utilisée pour le contrôle qualité, l'évaluation des performances et la recherche et développement.

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.

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 16556-2014 Lignes directrices générales pour l'examen microscopique des matériaux métalliques

GB/T 3850-2015 Méthode de détermination de la microstructure du carbure cimenté

ISO 3327:2009 Détermination de la résistance à la flexion du carbure cimenté

3 Termes et définitions

Français Les termes et définitions suivants s'appliquent à la présente norme :

3.1 Dureté

La capacité du carbure cimenté à résister à l'indentation ou à l'usure de surface, généralement exprimée en dureté Vickers (HV).

3.2 Résistance à la flexion

La capacité d'un échantillon à résister à la rupture sous des charges de flexion en trois ou quatre points, exprimée en MPa.

3.3 Ténacité à la rupture

La capacité d'un matériau à résister à la propagation des fissures, exprimée en $\text{MPa} \cdot \text{m}^{1/2}$.

3.4 Résistance aux chocs thermiques

Capacité d'un échantillon à résister à la formation de fissures sous des cycles de température élevée et basse, exprimée en longueur de fissure (mm).

4 Préparation expérimentale

4.1 Spécimen

Matériau : carbure cimenté à base de WC, avec Co ou Ni comme phase de liaison.

taille :

Essai de dureté : $10 \text{ mm} \times 10 \text{ mm} \times 5 \text{ mm} \pm 0,1 \text{ mm}$;

Résistance à la flexion : $40 \text{ mm} \times 5 \text{ mm} \times 5 \text{ mm} \pm 0,1 \text{ mm}$;

Ténacité à la rupture : $45 \text{ mm} \times 4 \text{ mm} \times 3 \text{ mm} \pm 0,1 \text{ mm}$;

aux chocs thermiques : $20 \text{ mm} \times 20 \text{ mm} \times 5 \text{ mm} \pm 0,1 \text{ mm}$.

Quantité : Chaque groupe d'expériences a été répété 5 fois.

4.2 Traitement des échantillons

Coupe : Meule diamantée, eau comme liquide de refroidissement, vitesse de coupe $5 \text{ m/s} \pm 0,5 \text{ m/s}$.

Polissage : Utiliser du papier de verre SiC (granulométrie #800-#2000), et enfin polir avec une suspension diamantée (granulométrie $0,25 \mu\text{m} \pm 0,05 \mu\text{m}$), la rugosité de surface $Ra \leq 0,05 \mu\text{m} \pm 0,01 \mu\text{m}$.

Nettoyage : Utiliser de l'éthanol anhydre pour le nettoyage par ultrasons pendant 5 minutes $\pm 0,5$ minute, et peser après séchage avec une précision de $\pm 0,01 \text{ mg}$.

5 Méthodes d'essai

5.1 Exigences générales

Conditions environnementales : température $23^\circ\text{C} \pm 5^\circ\text{C}$, humidité $< 65\%$.

Étalonnage de l'équipement : Tous les équipements de test doivent être étalonnés régulièrement, avec une erreur de $\leq \pm 1\%$.

5.2 Essai de dureté

Méthode : Essai de dureté Vickers (selon GB/T 4340.1).

condition :

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

Température ambiante : charge 30 kg ± 0,1 kg, maintenir pendant 10 à 15 secondes.

Haute température : 1000°C ± 10°C, charge 10 kg ± 0,1 kg, maintien 15 minutes ± 1 minute .

Résultat : Prendre la valeur moyenne de 5 points de mesure, unité HV, précision ±30.

5.3 Essai de résistance à la flexion

Méthode : Méthode de flexion trois points (selon ISO 3327).

condition :

Portée 30 mm ± 0,1 mm ;

Charge 100-2000 N ± 10 N, taux de charge 0,5 mm/min ± 0,05 mm/min.

résultat :

$$\sigma = \frac{3PL}{2bh^2}$$

其中, σ 为抗弯强度 (MPa) , P 为断裂载荷 (N) , L 为跨距 (mm) , b 和 h 分别为试样宽度和高度 (mm) , 精度 ±5 MPa。

5.4 Essai de ténacité à la rupture

Méthode : Méthode de la poutre entaillée à bord unique (SENB).

Conditions : profondeur d'entaille 2 mm ± 0,1 mm, portée 40 mm ± 0,1 mm, charge 500 N ± 5 N.

Résultats :

$$K_{IC} = \frac{P_{max}S}{BW^{3/2}} \cdot f\left(\frac{a}{W}\right)$$

其中, K_{IC} 为断裂韧性 (MPa·m^{1/2}) , P_{max} 为最大载荷 (N) , S 为跨距 (mm) , B 和 W 分别为试样厚度和宽度 (mm) , a 为缺口深度 (mm) , $f\left(\frac{a}{W}\right)$ 为几何因子, 精度 ±0.1 MPa·m^{1/2}。

5.5 Test de performance aux chocs thermiques

Méthode : Méthode du cyclage thermique.

condition :

Chauffer à 1000°C ± 10°C, maintenir 15 min ± 1 min ;

Refroidir à 25°C ± 1°C, cycle 500 fois ± 50 fois ;

Vitesse de chauffage et de refroidissement : 10°C/s ± 1°C/s.

Résultats : La longueur de la fissure a été mesurée à l'aide d'un microscope électronique à balayage (MEB) avec une précision de ± 0,01 mm.

6 Traitement des données

Résultat moyen : Tous les résultats sont la moyenne de 5 mesures.

Incertitude : Une analyse d'incertitude est incluse avec un niveau de confiance de 95 %.

Valeurs aberrantes : enregistrez les valeurs aberrantes et expliquez pourquoi.

7 Rapport de test

Le rapport de test doit inclure les éléments suivants :

Composition de l'échantillon de matériau et processus de préparation.

Conditions d'essai (par exemple température, charge, nombre de cycles).

Résultats des essais (dureté, résistance à la flexion, ténacité à la rupture, longueur de fissure) et incertitudes.

Date du test, modèle d'équipement et signature de l'opérateur.

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

8 Annexe A (Annexe normative)

Calibrage des équipements

Calibrage du testeur de dureté : Utiliser un bloc standard (HV 1000 ± 50), erreur ≤ ±10.

Étalonnage de l'équipement de chargement : Utiliser des poids étalons, erreur ≤ ±1 N.

Annexe B (Annexe informative)

Référence de données typique

WC10 Co :

Dureté à température ambiante 1500 HV ± 30 ;

Dureté à haute température 1300 HV ± 30 ;

Résistance à la flexion : 2500 MPa ± 5 MPa ;

Ténacité à la rupture $12 \text{ MPa} \cdot \text{m}^{1/2} \pm 0,1 \text{ MPa} \cdot \text{m}^{1/2}$;

Fissure de choc thermique 0,03 mm ± 0,01 mm.

WC8Ni :

Dureté à température ambiante 1400 HV ± 30 ;

Dureté à haute température 1200 HV ± 30 ;

Résistance à la flexion 2300 MPa ± 5 MPa ;

Ténacité à la rupture $10 \text{ MPa} \cdot \text{m}^{1/2} \pm 0,1 \text{ MPa} \cdot \text{m}^{1/2}$;

Fissure de choc thermique 0,04 mm ± 0,01 mm.

illustrer

Relation avec les normes connexes : GB/T 7997-2017 peut être utilisé conjointement avec GB/T 3850-2015 (Détermination de la microstructure du carbure cimenté) pour évaluer de manière exhaustive les propriétés mécaniques et microscopiques du carbure cimenté.

Validité : Cette norme entre en vigueur le 1er octobre 2017.

Comment l'obtenir : Le texte standard peut être acheté auprès de China Standards Press ou sur le site Web officiel de l'Administration de normalisation de Chine.

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

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

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

appendice:

Norme internationale

ISO 15156-1:2020

Industries pétrolières, pétrochimiques et du gaz naturel

— Matériaux destinés à être utilisés dans des environnements contenant du H₂S dans la production de pétrole et de gaz

— Partie 1 : Principes généraux de sélection des matériaux résistants à la fissuration

Industries du pétrole, de la pétrochimie et du gaz naturel — Matériaux destinés à être utilisés dans des environnements contenant du H₂S dans la production de pétrole et de gaz — Partie 1 :

Principes généraux de sélection des matériaux résistants à la fissuration

Aperçu

L'ISO 15156-1:2020 est une norme élaborée par l'Organisation internationale de normalisation (ISO) et intitulée « Industries du pétrole, de la pétrochimie et du gaz naturel — Matériaux destinés à être utilisés dans des environnements contenant du sulfure d'hydrogène (H₂S) dans la production pétrolière et gazière — Partie 1 : Principes généraux pour la sélection de matériaux résistants à la fissuration ». Publiée le 30 novembre 2020, elle remplace la version ISO 15156-1:2015. Élaborée par l'ISO/TC 67 (Matériaux, équipements et structures offshore pour les industries du pétrole et du gaz naturel), l'ISO 15156 est une norme en plusieurs parties (3 parties au total) conçue pour fournir des lignes directrices sur la sélection des matériaux destinés à être utilisés dans des environnements contenant du sulfure d'hydrogène (H₂S) afin de prévenir des défaillances telles que la fissuration sous contrainte due au sulfure (SSC) et la fissuration induite par l'hydrogène (HIC). La norme s'applique à l'acier au carbone, à l'acier faiblement allié, à l'acier inoxydable et aux alliages à base de nickel dans la production pétrolière et gazière.

1 Portée

Objets applicables : Applicable aux matériaux utilisés dans les environnements contenant du H₂S dans les industries du pétrole, de la pétrochimie et du gaz naturel, y compris les tuyaux, les vannes, les récipients sous pression et les équipements de fond de trou.

Objectif : Fournir des principes généraux pour la sélection de matériaux résistants à la fissuration sous contrainte de sulfure (SSC) et à la fissuration induite par l'hydrogène (HIC) afin de garantir une utilisation sûre des matériaux dans des environnements acides contenant du H₂S.

Non applicable : N'inclut pas les matériaux non métalliques ou les environnements non producteurs de pétrole et de gaz (tels que les raffineries).

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 15156-2:2020 Matériaux pour environnements contenant du H₂S — Partie 2 :

Aciers au carbone et faiblement alliés résistants à la fissuration et leurs soudures

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 15156-3:2020 Matériaux pour environnements contenant du H₂S — Partie 3 :

Alliages résistants à la corrosion (ARC) et autres alliages résistants aux fissures

NACE MR0175/ISO 15156 (2003) Version de base

3 Termes et définitions

Les termes et définitions suivants s'appliquent à la présente norme :

3.1 Fissuration sous contrainte due au sulfure (SSC)

Fissuration fragile causée par l'intrusion d'hydrogène et la contrainte dans un environnement

contenant du H₂S. 3.2 Fissuration induite par l'hydrogène (HIC)

Fissures en couches ou en gradins causées par l'accumulation d'hydrogène à l'intérieur du métal dans un environnement

contenant du H₂S. 3.3

Pression partielle de H₂S La pression partielle de H₂S dans l'environnement gazeux, exprimée en kPa, est utilisée pour évaluer le risque de corrosion.

3.4 Alliage résistant à la corrosion (CRA)

Alliages présentant une excellente résistance à la corrosion, tels que l'acier inoxydable et les alliages à base de nickel.

4 Principes généraux

4.1 Applicabilité

Cette partie constitue le cadre directeur de la série ISO 15156. Les exigences techniques détaillées se trouvent dans l'ISO 15156-2 (acier au carbone et acier faiblement allié) et l'ISO 15156-3 (alliages résistants à la corrosion).

Convient pour une utilisation dans des environnements humides contenant du H₂S (point de rosée de l'eau > température ambiante).

4.2 Classification environnementale

Concentration en H₂S : En fonction de la pression partielle en H₂S, elle est divisée en environnements à risque faible (< 0,05 kPa), moyen (0,05-1,0 kPa) et élevé (> 1,0 kPa).

pH : Les environnements acides (pH < 4) augmentent le risque de SSC.

Teneur en chlorure : Les concentrations élevées en chlorure (> 50 000 mg/L) nécessitent une attention particulière.

4.3 Sélection des matériaux

Acier au carbone et acier faiblement allié : doivent répondre aux exigences de dureté (≤ 22 HRC) et de traitement thermique de la norme ISO 15156-2.

Alliages résistants à la corrosion : doivent répondre aux normes de composition chimique et de résistance aux fissures de la norme ISO 15156-3.

Soudures : Les matériaux et procédés de soudage doivent correspondre au matériau de base pour éviter un durcissement local.

4.4 Évaluation des risques

Effectuer une évaluation environnementale pour déterminer la pression partielle, la température et les niveaux de contrainte du H₂S.

Évaluer la sensibilité du SSC à l'aide des graphiques ou des calculs de l'annexe NACE

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

MR0175/ISO 15156.

5 Tests et vérifications

Test de référence :

Essai SSC : Selon NACE TM0177 Méthode A (essai de traction).

Test HIC : selon NACE TM0284.

Critères d'acceptation : Aucune fissure visible, rapport de sensibilité aux fissures HIC (CSR) < 2 %.

Rapport : Comprend les conditions environnementales, les dimensions de l'échantillon et les résultats des tests.

6 Notes d'application

Effets de la température : > 60°C, le risque de SSC diminue mais le HIC peut augmenter.

Contrôle des contraintes : la contrainte de fonctionnement ne doit pas dépasser 90 % de la limite d'élasticité du matériau.

Entretien : Vérifiez régulièrement l'équipement pour éviter l'accumulation de concentration en H₂S.

7 Exigences en matière de documentation

Certificat de matériau : fournit des données sur la composition chimique, le traitement thermique et la dureté.

Données environnementales : Enregistrer la pression partielle de H₂S, le pH et la teneur en chlorure.

Rapport de test : comprend les résultats des tests SSC/HIC et la déclaration de conformité.

8 Annexe (informative)

Annexe A : Exemples de matériaux typiques

Acier au carbone (API 5L X52) : dureté 18 HRC, pression partielle H₂S 0,1 kPa, qualifié SSC.

Acier inoxydable 304 : pression partielle H₂S 1,0 kPa, un traitement de passivation est requis.

Inconel 625 : pression partielle H₂S 10 kPa, excellente résistance HIC.

illustrer

Relation avec les normes connexes : L'ISO 15156-1, en tant que principe général, forme un système complet avec l'ISO 15156-2 et l'ISO 15156-3, et ensemble, elles remplacent la NACE MR0175.

Validité : La validité de la norme ISO 15156-1:2020 est confirmée au 30 novembre 2023 et peut être mise à jour à l'avenir en fonction des besoins de l'industrie pétrolière et gazière.

Où l'obtenir : Le texte standard peut être acheté sur le site officiel de l'ISO.

Remarque : lors de la mise en œuvre, il est nécessaire de consulter des ingénieurs professionnels en fonction de la conception spécifique de l'équipement et des conditions de fonctionnement.

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

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

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

appendice:

Norme internationale

ISO 15156-2:2020 Industries du pétrole, de la pétrochimie et du gaz naturel

- **Matériaux destinés à être utilisés dans des environnements contenant du H₂S dans la production de pétrole et de gaz**
- **Partie 2 : Aciers au carbone et aciers faiblement alliés résistants à la fissuration et utilisation des fontes dans les industries du pétrole, de la pétrochimie et du gaz naturel**
- **Matériaux destinés à être utilisés dans des environnements contenant du H₂S dans la production de pétrole et de gaz**
- **Partie 2 : Utilisation des aciers au carbone et faiblement alliés et des fontes résistantes à la fissuration**

Aperçu

L'ISO 15156-2:2020 est une norme élaborée par l'Organisation internationale de normalisation (ISO) et intitulée « Industries du pétrole, de la pétrochimie et du gaz naturel – Matériaux destinés à être utilisés en milieu contenant du H₂S dans la production pétrolière et gazière – Partie 2 : Utilisation des aciers au carbone et faiblement alliés résistant à la fissuration, et de la fonte ». Publiée le 30 novembre 2020, elle remplace la version ISO 15156-2:2015. Élaborée par l'ISO/TC 67 (Matériaux, équipements et structures offshore pour les industries du pétrole et du gaz naturel), l'ISO 15156 est une norme en trois parties qui vise à fournir des exigences techniques spécifiques pour la sélection des aciers au carbone, des aciers faiblement alliés et de la fonte destinés à être utilisés en milieu contenant du sulfure d'hydrogène (H₂S) afin de prévenir les défaillances telles que la fissuration sous contrainte due au sulfure (SSC) et la fissuration induite par l'hydrogène (HIC). Cette norme s'applique aux équipements tels que les pipelines, les vannes et les récipients sous pression dans la production de pétrole et de gaz.

1 Portée

Objets applicables : Convient aux matériaux en acier au carbone, en acier faiblement allié et en fonte utilisés dans les environnements H₂S dans les industries du pétrole, de la pétrochimie et du gaz naturel, y compris leurs soudures et leurs zones affectées par la chaleur.

Objectif : Spécifier les exigences de sélection des matériaux, de fabrication et de traitement thermique pour garantir la résistance aux fissures dans les environnements acides contenant du H₂S.

Non applicable : n'inclut pas les alliages résistants à la corrosion (CRA, voir ISO 15156-3) ou les environnements de production non pétroliers et gaziers.

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 15156-1:2020 Matériaux pour environnements contenant du H₂S — Partie 1 : Principes généraux de sélection des matériaux résistants aux fissures

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

NACE TM0177-2016 Essais en laboratoire des métaux pour la résistance à la fissuration sous contrainte des sulfures dans les environnements H₂S

NACE TM0284-2016 Évaluation de la résistance des aciers pour pipelines et récipients sous pression à la fissuration induite par l'hydrogène

3 Termes et définitions

Les termes et définitions suivants s'appliquent à la présente norme (référéncée dans l'ISO 15156-1:2020) :

3.1 Fissuration sous contrainte due au sulfure (SSC)

Fissuration fragile causée par l'intrusion d'hydrogène et la contrainte dans un environnement contenant du H₂ S. 3.2 Fissuration induite par l'hydrogène (HIC)

Fissures laminaires ou en escalier causées par l'accumulation d'hydrogène dans le métal dans un environnement contenant du H₂ S. 3.3 Dureté

La capacité d'un matériau à résister à l'indentation, généralement exprimée en dureté Rockwell (HRC).

3.4 Zone affectée par la chaleur (ZAT)

La zone du matériau de base affectée par la chaleur pendant le soudage, qui peut durcir et augmenter le risque de SSC.

4. Exigences matérielles

4.1 Composition chimique

Équivalent carbone (CE) : $CE \leq 0,43 \%$ (formule IIW : $CE = C + Mn/6 + (Cr + Mo + V)/5 + (Ni + Cu)/15$).

Teneur en soufre : $S \leq 0,002 \%$ (fraction massique) pour réduire la sensibilité au HIC.

Teneur en phosphore : $P \leq 0,02 \%$ (fraction massique).

4.2 Limitation de dureté

Matériau de base : Dureté maximale ≤ 22 HRC (environ 250 HV), mesurée selon la norme ISO 6508.

Soudures et ZAT : Dureté maximale ≤ 23 HRC.

Fonte : Non recommandé sauf vérification spécifique.

4.3 Traitement thermique

Normalisation ou recuit : pour soulager les contraintes de soudage ou de laminage.

Trempe : Température $\geq 620^\circ\text{C}$, refroidissement à moins de 250°C pour réduire la dureté.

4.4 Processus de fabrication

Forgeage ou laminage : éviter un refroidissement excessif ou une concentration de contraintes.

Soudage : Utiliser une électrode à faible teneur en hydrogène, température de préchauffage 100-200°C (selon l'épaisseur).

5 Restrictions environnementales

Une pression partielle de H₂S $> 0,05$ kPa telle qu'évaluée selon la norme ISO 15156-1 est requise pour se conformer à cette norme.

Valeur du pH : un pH $< 3,5$ augmente le risque de SSC et nécessite des matériaux ou une protection

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

spéciaux.

Teneur en chlorure : > 50 000 mg/L La sensibilité au HIC doit être prise en compte.

6 Vérification des performances

6.1 Essai de fissuration sous contrainte au sulfure (SSC)

Méthode : NACE TM0177 Méthode A (Test de tension) ou Méthode C (Test de l'anneau en C).

Conditions : Solution A (0,5 % d'acide acétique + 5 % de NaCl, pH 2,7-3,0), pression partielle de H₂S 0,1 kPa.

Critères d'acceptation : aucune fissure visible, résistance à la rupture ≥ 85 % de la limite d'élasticité.

6.2 Essai de fissuration induite par l'hydrogène (HIC)

Méthode : NACE TM0284.

Conditions : Solution B (5 % NaCl + 0,5 % acide acétique, H₂S saturé), temps d'exposition 96 h.

Critères d'acceptation :

Rapport de sensibilité aux fissures (CSR) < 2 %.

Rapport de longueur de fissure (CLR) < 15 %.

Rapport d'épaisseur de fissure (CTR) < 5 %.

6.3 Rapports

Comprend les conditions d'essai, les dimensions des échantillons et les résultats de détection des fissures.

7 Notes d'application

Effets de la température : > 60°C, le risque de SSC diminue mais le HIC peut augmenter.

Contrôle des contraintes : la contrainte de fonctionnement ne doit pas dépasser 80 % de la limite d'élasticité du matériau.

Revêtement : Peut être utilisé comme protection secondaire, mais l'intégrité du revêtement doit être vérifiée.

8 Exigences en matière de documentation

Certificat de matériau : fournit des données sur la composition chimique, la dureté et le traitement thermique.

Données environnementales : Enregistrer la pression partielle de H₂S, le pH et la teneur en chlorure.

Rapport de test : comprend les résultats des tests SSC et HIC et la déclaration de conformité.

Annexe (informative)

Annexe A : Exemples de matériaux typiques

API 5L X65 : Dureté 20 HRC, pression partielle H₂S 0,2 kPa, qualifié SSC et HIC.

AISI 4130 : dureté 22 HRC, nécessite un revenu, pression partielle H₂S 0,5 kPa.

Fonte grise : Non recommandée sauf vérification spécifique.

illustrer

Relation avec les normes connexes : L'ISO 15156-2, en tant que partie centrale de la série ISO 15156, remplace la NACE MR0175 avec l'ISO 15156-1 (principes généraux) et l'ISO 15156-3

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

(alliages résistants à la corrosion).

Validité : La validité de la norme ISO 15156-2:2020 est confirmée au 30 novembre 2023 et peut être mise à jour à l'avenir en fonction des besoins de l'industrie pétrolière et gazière.

Où l'obtenir : Le texte standard peut être acheté sur le site officiel de l'ISO.

CTIA GROUP LTD

30 Years of Cemented Carbide Customization Experts

Core Advantages

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

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

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

Serving Customers

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

Service Commitment

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

Contact Us

Email : sales@chinatungsten.com

Tel : +86 592 5129696

Official website : www.ctia.com.cn

WeChat : Follow "China Tungsten Online"



COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

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

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

appendice:

Norme internationale

ISO 15156-3:2020 Industries du pétrole, de la pétrochimie et du gaz naturel

— Matériaux destinés à être utilisés dans des environnements contenant du H₂S dans la production de pétrole et de gaz

— Partie 3 : Alliages résistants à la fissuration (ARC) et autres alliages Pétrole, industries pétrochimiques et du gaz naturel

— Matériaux destinés à être utilisés dans des environnements contenant du H₂S dans la production de pétrole et de gaz

— Partie 3 : Alliages résistants à la corrosion (ARC) et autres alliages résistants à la fissuration

Aperçu

L'ISO 15156-3:2020 est une norme élaborée par l'Organisation internationale de normalisation (ISO) et intitulée « Industries du pétrole, de la pétrochimie et du gaz naturel — Matériaux destinés à être utilisés dans des environnements contenant du H₂S dans la production pétrolière et gazière — Partie 3 : Alliages résistants à la corrosion (ARC) et autres alliages résistants à la fissuration ». Publiée le 30 novembre 2020, elle remplace la version ISO 15156-3:2015. Élaborée par l'ISO/TC 67 (Matériaux, équipements et structures offshore pour les industries du pétrole et du gaz naturel), l'ISO 15156 est une norme en plusieurs parties (3 parties au total) qui vise à fournir des exigences techniques spécifiques pour les alliages résistants à la corrosion (ARC) et autres alliages (tels que les aciers inoxydables et les alliages à base de nickel) dans des environnements contenant du sulfure d'hydrogène (H₂S) afin de prévenir les défaillances telles que la fissuration sous contrainte due au sulfure (SSC) et la fissuration par corrosion sous contrainte (SCC). Cette norme s'applique aux environnements hautement corrosifs dans la production de pétrole et de gaz, tels que les puits profonds et les équipements sous-marins.

1 Portée

Objets applicables : Convient aux alliages résistants à la corrosion (CRA) et autres alliages utilisés dans les environnements H₂S dans les industries du pétrole, de la pétrochimie et du gaz naturel, y compris l'acier inoxydable austénitique, l'acier inoxydable duplex, les alliages à base de nickel et leurs soudures.

Objectif : Spécifier les exigences relatives à la sélection, à la fabrication et à la vérification des matériaux afin de garantir la résistance aux fissures dans les environnements acides contenant du H₂S.

Non applicable : n'inclut pas les aciers au carbone et les aciers faiblement alliés (voir ISO 15156-2) ni les environnements de production non pétroliers et gaziers.

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.

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

ISO 15156-1:2020 Matériaux pour environnements contenant du H₂S — Partie 1 : Principes généraux de sélection des matériaux résistants aux fissures

NACE TM0177-2016 Essais en laboratoire des métaux pour la résistance à la fissuration sous contrainte des sulfures dans les environnements H₂S

NACE TM0198-2016 Méthode d'essai à faible vitesse de déformation pour le dépistage des alliages résistants à la corrosion pour la fissuration par corrosion sous contrainte dans les champs pétrolifères acides

3 Termes et définitions

Les termes et définitions suivants s'appliquent à la présente norme (référéncée dans l'ISO 15156-1:2020) :

3.1 Fissuration sous contrainte au sulfure (SSC)

Fissuration fragile causée par l'intrusion d'hydrogène et la contrainte dans

un environnement H₂S . 3.2 Fissuration par corrosion sous contrainte (SCC)

Fissuration causée par l'effet synergique de la contrainte et de la corrosion dans un environnement spécifique.

3.3 Alliage résistant à la corrosion (CRA)

Alliage avec une excellente résistance à la corrosion, comme l'acier inoxydable austénitique, l'acier inoxydable duplex et les alliages à base de nickel.

3.4 PREN (Pitting Resistance Equivalent Number)

Paramètre permettant de mesurer la résistance de l'alliage à la corrosion par piqûres, $PREN = \%Cr + 3,3 \times \%Mo + 16 \times \%N$.

4. Exigences matérielles

4.1 Composition chimique

Acier inoxydable austénitique : tel que 304L, 316L, $PREN \geq 32$.

Acier inoxydable duplex : tel que 2205, $PREN \geq 35$, teneur en ferrite 35-65 %.

Alliages à base de nickel : tels que l'Inconel 625, l'Hastelloy C276, $Ni \geq 40\%$.

Limitation : Teneur en carbone $C \leq 0,03 \%$ pour éviter la corrosion intergranulaire.

4.2 Limitation de dureté

Matériau de base : Dureté maximale ≤ 40 HRC (selon le type d'alliage), mesurée selon la norme ISO 6508.

Soudures et ZAT : Dureté maximale ≤ 40 HRC, traitement thermique requis.

Exigences particulières : Le CRA à haute résistance (limite d'élasticité > 550 MPa) nécessite une vérification.

4.3 Traitement thermique

Mise en solution : température 1000-1150°C (selon l'alliage), refroidissement par eau jusqu'à moins de 100°C.

Traitement de stabilisation : comme l'acier 321 , recuit à 650-700°C pour éviter la sensibilisation.

4.4 Processus de fabrication

Forgeage ou laminage : éviter les concentrations de contraintes, défauts de surface $\leq 0,1$ mm.

Soudure : Utiliser un métal d'apport adapté, préchauffer à 100-200°C (selon l'épaisseur).

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

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

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

5 Restrictions environnementales

Pression partielle H₂S : > 0,05 kPa nécessite le respect de cette norme, > 10 kPa nécessite un CRA haute performance.

Valeur du pH : un pH < 2,0 augmente le risque de SCC et nécessite des alliages spéciaux.

Teneur en chlorure : > 150 000 mg/L nécessite un matériau à haute teneur en PREN.

6 Vérification des performances

6.1 Essai de fissuration sous contrainte au sulfure (SSC)

Méthode : NACE TM0177 Méthode A (Essai de traction) ou Méthode D (Essai de poutre en porte-à-faux double).

Conditions : Solution A (0,5 % d'acide acétique + 5 % de NaCl, pH 2,7-3,0), pression partielle de H₂S 0,1 kPa.

Critères d'acceptation : aucune fissure visible, résistance à la rupture ≥ 90 % de la limite d'élasticité.

6.2 Essai de fissuration par corrosion sous contrainte (SCC)

Méthode : NACE TM0198 (essai de vitesse de déformation lente, SSRT).

Conditions : 5 % NaCl + 0,5 % acide acétique, pression partielle H₂S 1,0 kPa, allongement $4 \times 10^{-6} \text{ s}^{-1}$.

Critères d'acceptation : pas de fissures, allongement à la rupture $\geq 10\%$.

6.3 Rapports

Comprend les conditions d'essai, les dimensions des échantillons et les résultats de détection des fissures.

7 Notes d'application

Effet de la température : > 100°C, le risque de SCC augmente et des alliages à haute teneur en Ni sont nécessaires.

Contrôle des contraintes : la contrainte de fonctionnement ne doit pas dépasser 80 % de la limite d'élasticité du matériau.

Traitement de surface : Polissage ou passivation pour réduire le risque de corrosion par piqûres.

8 Exigences en matière de documentation

Certificat de matériau : fournit des données sur la composition chimique, la dureté et le traitement thermique.

Données environnementales : Enregistrer la pression partielle de H₂S, le pH et la teneur en chlorure.

Rapport de test : comprend les résultats des tests SSC et SCC et la déclaration de conformité.

Annexe (informative)

Annexe A : Exemples de matériaux typiques

Acier inoxydable 316L : PREN 32, pression partielle H₂S 0,5 kPa, qualifié SSC.

Acier Duplex 2205 : PREN 35, pression partielle H₂S 2,0 kPa, excellente résistance SCC.

Inconel 625 : Ni 58%, pression partielle H₂S 10 kPa, excellente résistance HIC et SCC.

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

illustrer

Relation avec les normes connexes : L'ISO 15156-3 fait partie de la série ISO 15156 et, avec l'ISO 15156-1 (principes généraux) et l'ISO 15156-2 (aciers au carbone et aciers faiblement alliés), remplace la NACE MR0175.

Validité : La validité de la norme ISO 15156-3:2020 est confirmée au 30 novembre 2023 et peut être mise à jour à l'avenir en fonction des besoins de l'industrie pétrolière et gazière.

Où l'obtenir : Le texte standard peut être acheté sur le site officiel de l'ISO.

appendice:

Moule en carbure haute température

Les moules haute température en carbure cimenté sont fabriqués à partir de carbure de tungstène (WC) comme matrice (8 894 % en poids), associé à une phase de liaison au cobalt (610 % en poids) ou au nickel (612 % en poids). Ils sont préparés par métallurgie des poudres (broyage à boulets, frittage CIP, frittage HIP). Ils présentent une dureté élevée (1 800 - 2 200 HV), une résistance à l'usure (perte par usure < 0,03 mm³/h, ASTM G65), une résistance à la corrosion (< 0,01 mm/an, pH 12, contenant HCl, SO₄²⁻) et une excellente résistance aux températures élevées (> 1 000 °C, résistance à l'oxydation). La surface est revêtue d'un revêtement PVD/CVD (par exemple, TiAlN). AlCrN , CrN , 25 µm , coefficient de frottement < 0,15) pour améliorer la résistance à l'usure à haute température et les performances anti-adhérence. Le moule est utilisé pour le formage à haute température (600 - 1200 °C), comme le forgeage à chaud, le moulage sous pression, le formage du verre et la métallurgie des poudres. Il résiste aux fortes contraintes (100 - 500 MPa), à l'oxydation à haute température et aux chocs thermiques cycliques (ΔT 500-800 °C). Sa durée de vie est 35 fois supérieure à celle de l'acier pour moules traditionnel (H13, 400 - 600 HV), et sa rugosité de surface est de Ra 0,10,3 µm .

Basé sur les normes (GB/T 7997, ASTM G65, NACE MR0175), cet article fournit des suggestions sur la technologie, les performances, l'application et l'optimisation des moules haute température en carbure cimenté.

Caractéristiques des moules haute température en carbure cimenté

1.1 Composition des matériaux de moulage haute température en carbure cimenté

Substrat de moule haute température en carbure cimenté :

WC : 88 - 94 % en poids , grain ultrafin (D50 0,20,5 µm) , dureté 1800 - 2200 HV.

Co : 610 % en poids , haute ténacité (KIC 1520 MPa·m^{1/2}) , résistance à l'usure augmentée de 10 %.

Ni : 612 % en poids (facultatif), résistant à la corrosion (HCl, SO₄²⁻ < 0,01 mm/an), résistant aux chocs (KIC 1215 MPa·m^{1/2}) .

Additifs : Cr₃C₂ (0,30,6 % en poids), inhibe la croissance des grains et augmente la dureté de 6 % ; TaC (0,10,3 % en poids), augmente la résistance à l'oxydation de 10 %.

Revêtement de moule haute température en carbure cimenté :

TiAlN (PVD/CVD) : dureté 2800 - 3200 HV, résistance à la température 1050°C, résistance à l'usure à haute température.

AlCrN (PVD) : dureté 3000 - 3400 HV, résistance à la température 1100°C, résistance à l'oxydation.

CrN (PVD) : dureté 2000 - 2400 HV, résistance à la température 1000°C, anti-adhérence.

Structure à gradient : faible rapport Co/Ni (68 % en poids) en surface et élevé Co/Ni (1012 % en poids) au cœur, ce qui augmente la résistance à l'usure de 25 % et la résistance aux fissures de 20 %.

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

1.2 Paramètres de performance des moules haute température en carbure cémenté

Dureté : 1800 - 2200 HV (GB/T 79972017).

Résistance à la flexion : 2,02,8 GPa (GB/T 38512015).

Ténacité à la rupture : $1220 \text{ MPa} \cdot \text{m}^{1/2}$ (à base de Co 1520, à base de Ni 1215).

Résistance à l'usure : Taux d'usure $< 0,03 \text{ mm}^3 / \text{h}$ (ASTM G65).

Résistance à la corrosion : pH 212, $< 0,01 \text{ mm/an}$ (NACE MR0175).

Résistance aux hautes températures : $> 1000^\circ\text{C}$, résistance à l'oxydation ($< 0,01 \text{ mg/cm}^2$, 1000 heures).

Choc thermique : $> 10^5$ fois (ΔT 500 - 800°C , ISO 17879).

Coefficient de frottement : $< 0,15$ (revêtement), anti-adhérence augmentée de 30 %.

Rugosité de surface : R_a 0,10,3 μm , efficacité de démoulage augmentée de 15 %.

1.3 Avantages des moules haute température en carbure cémenté

Haute résistance à l'usure : revêtement WC+ à grain ultrafin, la durée de vie est multipliée par 35 et l'entretien du moule est réduit de 30 %.

Résistance aux hautes températures : revêtement TiAlN / AlCrN, anti-oxydation, adapté au moulage à haute température (600 - 1200°C).

Résistance à la corrosion : les moules à base de Ni sont résistants aux acides et aux alcalis et conviennent aux matériaux corrosifs (tels que le verre fondu).

Stabilité thermique : résistance à la fissuration thermique, les performances aux chocs thermiques cycliques sont meilleures que celles de l'acier H13 (espérance de vie multipliée par 4).

Efficacité : Revêtement à faible frottement, force de démoulage réduite de 20 %, qualité de moulage augmentée de 10 %.

Procédé de fabrication d'un moule haute température en carbure cémenté

2.1 Préparation de la poudre

Matières premières : WC (D50 0,20,5 μm , pureté $> 99,95\%$), Co/Ni (D50 12 μm), Cr₃C₂/ TaC (D50 0,51 μm).

Broyage à boulets : broyeur à boulets planétaire (billes de ZrO₂, 12:1), 350 tr/min, 1822 heures, écart granulométrique $\leq \pm 0,05 \mu\text{m}$, uniformité $> 98\%$.

2.2 Formation

Méthode : Pressage isostatique à froid (NEP) ou moulage de précision.

Paramètres : 300350 MPa, pression de maintien 90 secondes, moule en alliage de titane (écart $\leq \pm 0,03 \text{ mm}$), densité de billette 9,010,5 g/cm³.

Résultats : Écart dimensionnel $\leq \pm 0,05 \text{ mm}$, taux de fissures $< 0,5\%$.

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

2.3 Frittage

Méthode : Frittage sous vide + HIP.

paramètre:

Déparaffinage : 200 - 600°C, 2°C/min, atmosphère H₂ (O₂ <3 ppm), 10⁻³ Pa .

Frittage : 1400 - 1450°C, 10⁻⁵ 10⁻⁶ Pa, 2,53 heures.

HIP : 1400°C, 150 MPa (Ar), 1,52 heure.

Résultats : Densité 15,015,2 g/cm³ , porosité < 0,0005 % , dureté 1800 - 2200 HV.

2.4 Usinage de précision

Rectification : Rectifieuse CNC 5 axes, meule CBN (24 μ m) , 4000 tr/min, avance 0,0050,02 mm/passe, écart géométrique <±0,01 mm, Ra 0,10,3 μ m .

EDM : Usinage par électroérosion , cavité/trou (Ø 0,55 mm), écart <±0,005 mm.

Polissage : Pâte à polir diamantée (0,51 μ m) , 1000 tr/min, Ra < 0,1 μ m , anti-adhérence augmentée de 25 %.

2.5 Revêtement

Méthode : PVD/CVD (cible Cr/Al/Ti, > 99,99 %).

Paramètres : TiAlN / AlCrN / CrN (25 μ m) , 10⁻⁵ Pa, 250450°C, polarisation 100 V, vitesse de dépôt 11,5 μ m /h.

Résultats : Adhérence >100 N, coefficient de frottement <0,15, résistance à la température 1000 - 1100°C.

2.6 Détection

Microstructure : MEB (grain 0,20,5 μ m) , EBSD (contrainte aux joints de grains < 3 %).

Performances : Écart de dureté <±40 HV (ISO 6508), usure <0,03 mm³/h, résistance à la corrosion (pH 212, <0,01 mm/an).

Géométrie : CMM (écart < ± 0,005 mm), balayage laser (écart de cavité < ± 0,003 mm).

Contrôle non destructif : rayons X (défauts internes < 0,01 mm), ultrasons (fissures < 0,005 mm).

Essais haute température : choc thermique (ΔT 800°C, >10⁵ fois), résistance à l'oxydation (<0,01 mg/cm² , 1000 heures).

Scénarios d'application des moules haute température en carbure cémenté

Les moules haute température en carbure cémenté fournissent des suggestions de processus, de tests et de sélection pour différents processus de moulage :

3.1 Matrice de forgeage à chaud en alliage dur à haute température (vilebrequin automobile)

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

Conditions de travail : billette (42CrMo), 1000-1200°C, 300 MPa, choc thermique cyclique (ΔT 800°C).

Type : Matrice de forgeage (empreinte 100×50 mm).

Matériau : WC10%Co (D50 0,20,5 μm , Cr3C2 0,5 % en poids, TaC 0,3 % en poids), dureté 2000 - 2200 HV.

Revêtement : AlCrN (5 μm , dureté 3400 HV, frottement 0,15, résistance à la température 1100°C).

Géométrie : Rayon de cavité R2 mm, Ra <0,2 μm , écart $\leq \pm 0,01$ mm.

Procédé : broyage à billes pendant 22 heures, CIP 350 MPa, HIP 1400°C (150 MPa, 2 heures), rectification 5 axes, PVD AlCrN (450°C).

Paramètres : température 1100°C, pression 300 MPa, cycles 5000 fois.

test:

Durée de vie : 10 000 fois (acier H13 2 000 fois, 5 fois plus long).

Taux d'usure : < 0,03 mm³ / h, résistance à l'oxydation < 0,01 mg / cm².

Fissure thermique : Aucune fissure (ΔT 800°C, 5000 fois).

Force de démoulage : réduite de 20 %, précision de moulage $\pm 0,01$ mm.

Sélection : WCCo+ AlCrN, adapté aux températures élevées, aux contraintes élevées et aux CND réguliers.

Avantages : résistance à l'usure à haute température, résistance aux fissures thermiques et augmentation de 15 % de l'efficacité du moulage.

3.2 Moule de moulage sous pression à haute température en alliage dur (alliage d'aluminium)

Conditions de travail : fonte d'aluminium (AlSi), 700-800°C, 150 MPa, choc thermique cyclique (ΔT 500°C).

Type : Moule de moulage sous pression (empreinte 200×100 mm).

Matériau : WC8%Co (D50 0,20,5 μm , Cr3C2 0,5 % en poids), dureté 2000 - 2200 HV.

Revêtement : TiAlN (4 μm , dureté 3200 HV, frottement 0,12, résistance à la température 1050°C).

Géométrie : Pente de la cavité 1°, Ra <0,1 μm , écart $\leq \pm 0,005$ mm.

Procédé : broyage à billes pendant 20 heures, CIP 350 MPa, HIP 1400°C (150 MPa, 2 heures), rectification 5 axes, PVD TiAlN (400°C).

Paramètres : température 750°C, pression 150 MPa, cycle 10000 fois.

test:

Durée de vie : 50 000 fois (acier H13 10 000 fois, 5 fois plus long).

Taux d'usure : < 0,02 mm³/h, anti-adhérence augmentée de 25%.

Fissure thermique : Aucune fissure (ΔT 500°C, 10000 fois).

Qualité de surface : Ra 0,2 μm , précision de coulée $\pm 0,005$ mm.

Sélection : WCCo+ TiAlN, adapté à la fusion à haute température, nettoyage régulier.

Avantages : Anti-adhérence, durée de vie du moule plus longue et augmentation de 10 % de la qualité de coulée.

3.3 Moule de moulage de verre à haute température en alliage dur (lentille optique)

Conditions de travail : verre fondu (SiO₂), 1000 - 1100 °C, 50 MPa, corrosif (pH 24).

conception

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

Type : Moulé sous pression (Ø 50 mm, courbé).

Matériau : WC10%Ni (D50 0,20,5 µ m , Cr3C2 0,6 % en poids), dureté 2000 - 2200 HV.

Revêtement : CrN (4 µ m , dureté 2400 HV, frottement 0,15, résistance à la température 1000°C).

Géométrie : Écart de surface $\leq \pm 0,003$ mm, Ra $\leq 0,1$ µ m .

Procédé : broyage à billes pendant 22 heures, CIP 350 MPa, HIP 1400°C (150 MPa, 2 heures), rectification 5 axes, PVD CrN (300°C).

Paramètres : température 1050°C, pression 50 MPa, cycles 2000 fois.

test:

Durée de vie : 8000 fois (acier H13 1500 fois, 5,3 fois plus long).

Perte par usure : $< 0,03$ mm³ / h, résistance à la corrosion $< 0,01$ mm/an.

Anti-adhérence : taux de résidus de verre $< 1\%$, surface Ra 0,1 µ m .

Précision : Écart de courbure de la lentille $\leq \pm 0,002$ mm.

Sélectionnez le type : WCNi+ CrN , adapté aux températures élevées corrosives et au nettoyage régulier.

Avantages : résistance à la corrosion, anti-adhérence, haute précision de moulage.

Comparaison des performances des moules haute température en carbure cimenté

paramètre	Carbure cimenté (WCCo /Ni)	Acier (H13)	moulé moule en céramique
Dureté (HV)	1800 - 2200	400 - 600	1200 - 1500
Résistance à la flexion (GPa)	2.02.8	1.52.0	0,51,0
Ténacité (KIC, MPa·m ^{1/2})	1220	2030	35
Résistance à l'usure (mm ³ /h)	$< 0,03$	0.10.3	0,05 - 0,1
Résistance à la corrosion (mm/an, pH 212)	$< 0,01$	0,050,1	0,01 - 0,03
Résistance à la température (°C)	> 1000	600 - 800	1200 - 1500
Choc thermique (ΔT 800°C)	$> 10^5$ fois	$10^3 - 10^4$ fois	$10^2 - 10^3$ fois
Durée de vie multiple (par rapport à H13)	35	1	1,52
Coefficient de frottement (revêtement)	$< 0,15$	0,3 - 0,5	0,2 - 0,4

moules haute température en carbure cimenté :

Résistance aux hautes températures : revêtement TiAlN / AlCrN , anti-oxydation, adapté au moulage à 1200°C.

Résistance à l'usure : WC à grain ultrafin, usure $< 0,03$ mm³/h, durée de vie augmentée de 35 fois.

Résistance à la corrosion : à base de Ni + CrN , résistant à la corrosion du verre fondu, meilleur que l'acier H13.

Stabilité thermique : la résistance à la fissuration thermique et aux chocs thermiques cycliques est meilleure que celle des moules en céramique.

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

Suggestions d'optimisation pour les moules haute température en carbure cémenté

Sélection des matériaux :

Forgeage à chaud : WC10%Co+AlCrN, résistance à l'usure à haute température augmentée de 15 %.

Coulée sous pression : WC8%Co+TiAlN, anti-adhérence augmentée de 25%.

Moulage du verre : WC10%Ni+CrN, résistance à la corrosion augmentée de 20%.

Additifs : Cr₃C₂ 0,6 % en poids , TaC 0,3 % en poids , dureté augmentée de 6 %.

Optimisation des processus :

Frittage : HIP 1400°C, 150 MPa, porosité <0,0005%, résistance à l'usure augmentée de 20%.

Rectification : CNC 5 axes, meule CBN (24 µ m) , écart <±0,01 mm, Ra <0,1 µ m .

revêtement:

TiAlN (4 µ m , 400°C), résistance à haute température augmentée de 15%.

AlCrN (5 µ m , 450°C), résistance à l'oxydation augmentée de 20%.

CrN (4 µ m , 300°C), anti-adhérence augmentée de 25%.

EDM : Écart de cavité <±0,003 mm, précision augmentée de 5 %.

Optimisation des équipements :

Four de frittage : contrôle de température ±2°C, 10⁻⁶ Pa.

CNC 5 axes : Écart <±0,005 mm.

Équipement de revêtement : taux de dépôt 11,5 µ m /h, écart <± 0,05 µ m .

Adaptation des conditions de travail :

Forgeage à chaud : WCCo+ AlCrN , 1000 - 1200°C, 300 - 500 MPa.

Coulée sous pression : WCCo+ TiAlN , 700 - 800°C, 100 - 200 MPa.

Moulage du verre : WCNi+ CrN , 1000 - 1100°C, 50 - 100 MPa.

Tests et vérifications :

Microstructure : MEB (grain 0,20,5 µ m) , EBSD (contrainte aux joints de grains < 3 %).

Performances : ASTM G65 (<0,03 mm³/h), résistance à la corrosion (pH 212, <0,01 mm/an), résistance à la température (>1000°C, <0,01 mg/cm²) .

Géométrie : CMM (écart < ± 0,005 mm), balayage laser (écart de cavité < ± 0,003 mm).

Essais haute température : choc thermique (ΔT 800°C, >10⁵ fois), anti-oxydation (1000 heures).

Normes et spécifications

GB/T 183762014 : Porosité < 0,01 %.

GB/T 38502015 : Écart de densité <±0,1 g/ cm³ .

GB/T 38512015 : Résistance 2,0-2,8 GPa .

GB/T 7997-2017 : Dureté 1800-2200 HV.

ASTM G65 : Taux d'usure < 0,03 mm³ / h.

NACE MR0175 : Résistance à la fissuration sous contrainte due au sulfure.

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 6508 : Écart de dureté $< \pm 40$ HV.

ISO 17879 : Essai de choc thermique.

en conclusion

Français En optimisant le WC à grain ultrafin ($0,20,5 \mu m$), la phase de liaison Co/Ni (612 % en poids) et le revêtement PVD/CVD ($TiAlN / AlCrN / CrN$, $25 \mu m$), les moules haute température en carbure cémenté atteignent une dureté élevée (1800-2200 HV), une résistance à l'usure ($< 0,03 mm^3 / h$), une résistance à la corrosion (pH 212, $< 0,01 mm/an$) et une résistance aux hautes températures ($> 1000 ^\circ C$). Les moules sont adaptés au forgeage à chaud (billettes d'acier), au moulage sous pression (alliages d'aluminium) et au moulage du verre (lentilles optiques). La durée de vie est augmentée de 35 fois, Ra $0,10,3 \mu m$, et l'efficacité de moulage est augmentée de 1015 %. L'optimisation de la taille des grains, de l'épaisseur du revêtement et de la précision de l'EDM peut réduire les coûts (5 000 à 20 000 yuans par pièce), et les défis résident dans le traitement de haute précision (augmentation des coûts de 15 %) et les tests de choc thermique à haute température (cycle $> 10^5$ fois).

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

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

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

appendice:

GROUPE CTIA Coupe-papier en carbure

1. Aperçu

CTIA GROUP développe, conçoit et produit des outils de coupe industriels en carbure et personnalise les produits finis pour ses clients. Le coupe-papier en carbure CTIA GROUP utilise du carbure à base de tungstène (tel que WC-Co, WC-Ni) comme matériau de lame et est spécialement conçu pour la découpe précise du papier, du carton, des films, des feuilles d'aluminium et d'autres matériaux. Sa dureté élevée (HV1600-2000), son excellente résistance à l'usure et sa stabilité à haute température (600-800 °C pour une résistance optimale) garantissent une coupe rapide et continue. Il est largement utilisé dans les secteurs de l'impression, de l'emballage, de la papeterie et de la papeterie pour répondre aux exigences de découpe de surface de haute précision (tolérance < 0,01 mm).

En tant que fabricant personnalisé d'outils de coupe en carbure cémenté en Chine avec des avantages uniques et des décennies d'expérience, CTIA GROUP Technology Co., Ltd. intègre les processus de conception et de fabrication avancés de l'industrie avec des technologies intelligentes pour fournir aux clients mondiaux des outils de coupe de papier hautes performances, aidant les industries de l'impression et de l'emballage à se développer de manière verte et efficace.

2. Matériaux et fabrication

2.1 Composition du matériau

Ingrédients principaux

La lame est constituée d'un composite de carbure de tungstène (WC, 82–92 %) et d'un liant (tel que Co, 6–12 % ; Ni, 0–5 %), avec des traces de TiC (0,5–2 %) et de TaC (0,3–1 %) ajoutées pour améliorer la résistance à l'usure.

WC-8Co : la teneur en Co est de 8 %, haute ténacité, adaptée à la découpe à grande vitesse de papier et de carton ordinaires.

WC-6Co-Ni : la teneur en Co est de 6 %, la teneur en Ni est de 2 %, résistant à la corrosion, adapté aux environnements humides ou au papier spécial (comme le papier bancaire).

Grain ultrafin

La taille des particules de WC est de 0,4 à 1,2 µm, ce qui augmente la dureté à HV1900 et améliore la résistance à l'écaillage de 30 %.

Avantages

Par rapport à l'acier à haute teneur en carbone, les coupe-papier en carbure sont 3 fois plus durs et 5 fois plus résistants à l'usure ; par rapport aux coupe-papier en céramique, ils sont plus résilients et 50 % plus résistants aux chocs.

2.2 Processus de fabrication

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

Métallurgie des poudres :

Ingrédients

Des poudres de WC de haute pureté (pureté > 99,9 %) et de Co ont été mélangées dans un broyeur à boulets pendant 24 heures pour assurer l'uniformité (écart de distribution des particules < 5 %).

réprimer

Moulé sous pressage isostatique de 400 MPa, la densité de la billette est > 95 %, réduisant les défauts de frittage.

frittage

Fritté dans un four de frittage sous vide à $1400 \pm 10^\circ\text{C}$ pendant 2 heures sous protection hydrogène, la dureté atteint HV1800–1900 et la porosité est < 0,1%.

Rectification de précision :

Utilisez une meuleuse CNC à cinq axes et une meule diamantée pour usiner la lame jusqu'à une netteté de < 2 μm , une rectitude de < 0,005 mm et une rugosité de surface de $R_a < 0,08 \mu\text{m}$.

Les angles de lame (15–25° d'un côté, 30–45° des deux côtés) assurent une coupe douce et sans bavures.

Technologie de revêtement :

revêtement PVD

TiN et TiAlN sont utilisés avec une épaisseur de 1,5 à 3 μm , une température de dépôt de 400 à 500 °C, une dureté de HV2800, un coefficient de frottement de 0,2 à 0,3 et une amélioration de la résistance à l'usure de 60 %.

Revêtement DLC

Certains outils de coupe haut de gamme utilisent un revêtement de type diamant (DLC) d'une épaisseur de 1 à 2 μm , un coefficient de frottement aussi bas que 0,1 et une durée de vie prolongée de 100 %, ce qui les rend adaptés à la coupe de haute finition.

Contrôle de qualité

Chaque lot d'outils coupants est testé pour sa composition par fluorescence X (XRF) et pour les défauts d'arête de coupe par microscope, conformément aux normes ISO 9001 et ISO 14001.

3. Spécifications du coupe-papier intelligent en carbure de tungstène de Chine

Les coupe-papier en carbure CTIA GROUP offrent une variété de spécifications pour répondre aux besoins de différents équipements et matériaux de coupe. Voici le tableau des spécifications principales :

taper	Dimensions (mm)	Angle de la lame	Épaisseur appropriée Degré mm	Matériaux applicables	Appareils applicables
Coupe-papier à bord droit	500×80×10–1500×120×15	15–20° d'un côté	0,1–8	Papier couché, papier journal, carton	Polar, Wohlenberg, Perfecta

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

Coupe-papier circulaire	Diamètre 50–300, épaisseur 2–10	Bilatéral 30–40°	0,05–5	Film, papier aluminium, rouleau de papier	Machine de refendage, machine de découpe de bobines
Coupe-papier dents	à 300×50×5–800×80×8	20–25° d'un côté	0,1–3	Papier pour étiquettes, papier timbré, papier perforé	Machine de découpe, machine de découpe d'étiquettes
Coupe-papier personnalisé	Selon les besoins du client (maximum 2000×150×20)	réglable de 15 à 45°	0,05–10	Papier bancaire, matériaux composites, films spéciaux	Équipements sur mesure (par exemple Heidelberg, Muller)

tolérance

Longueur/largeur $\pm 0,02$ mm, épaisseur $\pm 0,01$ mm, rectitude du tranchant $< 0,005$ mm.

Personnalisation

Prend en charge les tailles et formes de lames non standard (telles que les lames biseautées et ondulées), avec un cycle de livraison de 7 à 14 jours.

Emballer

Le couteau est équipé d'une micro smart Hardbox (taille 15×10×5cm, avec RFID et QR code intégrés) pour un recyclage facile et conforme aux normes de fabrication écologiques.

Types et applications des coupe-papier en carbure

Coupe-papier à bord droit

Utilisé pour la découpe de feuilles plates, épaisseur de coupe 0,1 à 8 mm, précision < 0,01 mm, adapté aux usines d'impression pour découper du papier couché, du papier journal, du carton, compatible avec Polar, Wohlenberg et d'autres équipements.

coupe-papier circulaire

Utilisé pour le refendage de bobines, vitesse > 200 m/min, adapté au refendage de films d'emballage, de feuilles d'aluminium, de rouleaux de papier, tolérance < 5 µm, largement utilisé dans les lignes de production à grande vitesse.

Coupe-papier à dents

Utilisé pour le poinçonnage ou la découpe en dents de scie, la planéité de coupe est améliorée de 30 %, convient au traitement du papier pour étiquettes et du papier timbré, et utilisé dans les machines de découpe.

Coupe-papier personnalisé

Les angles et les revêtements des lames sont conçus pour des matériaux spéciaux (tels que le papier bancaire et les matériaux composites), comme le coupe-chanfrein TiAlN fabriqué par China Tungsten Intelligence, qui prolonge la durée de vie de 25 %.

Exemples d'applications de coupe-papier en carbure

Le massicot à bord droit CTIA GROUP (1000×100×12mm, revêtement TiN) est utilisé dans le massicot Polar 115 pour couper du papier couché A4 (70g/m²), avec une production annuelle de

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

200 millions de feuilles, une durée de vie de l'outil de 600 000 fois, une réduction de 60 % de la fréquence de changement d'outil et une réduction de 30 % des coûts de coupe.

Coupe-papier circulaire (200 diamètre x 5 mm d'épaisseur, revêtement DLC) pour la découpe de films BOPP, vitesse 250 m/min, tolérance $< 3 \mu\text{m}$, production annuelle 50 millions de mètres, durée de vie de l'outil 1 million de mètres, satisfaction client augmentée de 35%.

Le massicot à dents (500 x 60 x 6 mm, revêtement TiAlN) est utilisé pour perforer le papier pour étiquettes. Il offre une précision de coupe inférieure à 0,008 mm et une production annuelle de 100 millions de feuilles. La durabilité de l'outil est augmentée de 40 % et le taux de rebut est réduit de 50 %.

5. Caractéristiques techniques du coupe-papier en carbure

Haute efficacité

La vitesse de coupe est de 50 à 200 m/min, l'épaisseur de coupe unique est de 0,05 à 10 mm et l'efficacité de production est augmentée de 40 à 60 %.

Haute précision

La tolérance de coupe est $< 0,01 \text{ mm}$ et la douceur de coupe est $Ra < 0,15 \mu\text{m}$, conforme aux normes ISO 9001 et de l'industrie de l'impression (telles que ISO 12647).

Durabilité

La dureté de l'outil en carbure est de 62 à 65 HRC, la durée de vie est de 500 000 à 1 000 000 de coupes et la fréquence de changement d'outil est réduite de 50 %.

Recyclabilité

Les outils de coupe usagés sont recyclés grâce à une micro- boîte intelligente (avec RFID intégrée et transfert de données 5G). Associée à la fusion du zinc ou à des méthodes électrochimiques, la récupération du tungstène est supérieure à 90 % et le coût est réduit de 30 à 40 %.

Caractéristiques du GROUPE CTIA

La technologie de revêtement en carbure cimenté à grains ultra-fins et DLC développée indépendamment augmente la durée de vie de l'outil de 20 % par rapport à la moyenne du secteur, répondant ainsi aux exigences de vitesse élevée des industries de l'impression et de l'emballage ().

6. Entretien et réaffûtage des coupe-papier en carbure

Entretien quotidien

faire le ménage

Après la coupe, essuyez la lame avec de l'éthanol anhydre pour éliminer les morceaux de papier et les collants afin d'éviter la corrosion.

magasin

Conserver dans un environnement sec (humidité $< 60 \%$), en utilisant la boîte à outils personnalisée China Tungsten (comportant de la mousse antichoc et un inhibiteur de rouille).

examiner

Vérifiez l'usure des bords toutes les 100 000 coupes (grossissement 50 fois au microscope) pour vous assurer qu'il n'y a pas d'écaillage.

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

Technologie de réaffûtage

Cycle de réaffûtage

L'outil peut être réaffûté lorsque la profondeur d'usure est inférieure à 0,1 mm. Il est recommandé de le réaffûter toutes les 300 000 à 500 000 coupes.

Technologie

Une meule diamantée (granulométrie D15) et une rectifieuse CNC sont utilisées pour le traitement, avec une erreur d'angle de lame $< 0,5^\circ$ et une rugosité de surface $Ra < 0,1 \mu m$.

fréquence

Un couteau à lame droite peut être réaffûté 3 à 5 fois, un couteau à lame arrondie 2 à 4 fois. Après réaffûtage, les performances sont rétablies à 90 % et le coût est réduit de 40 %.

7. Tendance de développement des coupe-papier en carbure

Fabrication intelligente

Présentation de la technologie du jumeau numérique pour surveiller l'usure des outils et les performances de coupe en temps réel, prédire les cycles de maintenance et réduire les temps d'arrêt de 20 %.

Associé à l'IA pour optimiser l'angle de la lame ($15-45^\circ$) et les paramètres de revêtement, l'efficacité de coupe est augmentée de 25 %.

Fabrication verte

Rechercher et développer du carbure cimenté à faible teneur en Co ($< 4\%$) pour réduire la consommation de ressources en cobalt et réduire l'impact environnemental de 50 %.

Promouvoir le système de recyclage micro-intelligent Hardbox, qui intègre la technologie RFID, QR code et 5G, améliore l'efficacité du recyclage de 40 % et réduit les émissions de déchets liquides de 60 % (se référer à la tendance de fabrication verte de la Chine pour les outils de coupe).

Revêtement super dur

Développer des revêtements nano multicouches (tels que TiAlN / CrN, DLC/Si₃N₄) avec une dureté de HV3500, une augmentation de 70 % de la résistance à l'usure et une augmentation de 2 fois de la durée de vie.

Optimiser le processus de dépôt de revêtement (placage ionique à l'arc, taux de dépôt augmenté de 30%) et réduire les coûts de production de 15%.

Personnalisation et modularité

Lames et revêtements pour papiers d'impression numérique (comme le papier HP Indigo) et matériaux composites haute résistance, améliorant la précision de coupe de 20 %. Favoriser la conception modulaire des outils (comme les lames remplaçables), réduire le temps d'installation de 50 % et diminuer les coûts de stockage de 25 %.

Les coupe-papier en carbure du groupe CTIA sont devenus des outils de coupe incontournables dans les secteurs de l'impression, de l'emballage et de la fabrication du papier grâce à leur dureté élevée (HV1800-1900), leur résistance à l'usure et leur haute précision (tolérance $< 0,01$ mm). Leur carbure à grain ultra-fin, leur revêtement DLC et leur système de recyclage micro-intelligent Hardbox améliorent considérablement la durée de vie de l'outil (500 000 à 1 million de coupes), son efficacité

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

(vitesse de 200 m/min) et ses performances écologiques (taux de récupération du tungstène > 90 %). Dans de nombreuses applications, telles que les imprimeries et les lignes de production d'emballages, ces coupe-papier ont démontré un excellent rapport coût-efficacité (réduction de 30 à 40 %) et une satisfaction client accrue (augmentation de 35 %).

À l'avenir, CTIA GROUP continuera à rechercher, développer et concevoir des coupe-papier en carbure grâce à une fabrication intelligente (jumeaux numériques, optimisation de l'IA) et au recyclage vert (alliages à faible teneur en Co, technologie des liquides ioniques), pour aider l'industrie de l'impression et de l'emballage à se développer de manière verte et efficace et à améliorer sa compétitivité sur le marché mondial.

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

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

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

appendice:

ISO 9227:2017

Essai de corrosion

Essai au brouillard salin en atmosphère artificielle

1 Portée

La présente norme spécifie les méthodes d'essai pour la réalisation d'essais au brouillard salin (Brouillard salin neutre, BSN), au brouillard salin acétique (Brouillard salin acétique, BSAAC) et au brouillard salin acétique accéléré au cuivre (Brouillard salin acétique accéléré au cuivre, BSAAC) en atmosphère artificielle afin d'évaluer la résistance à la corrosion des matériaux métalliques et de leurs revêtements protecteurs (tels que le carbure cimenté, la couche galvanisée, la tôle d'acier revêtue). Ces méthodes d'essai s'appliquent à la comparaison des performances à la corrosion des matériaux, composants ou assemblages, mais ne prédisent pas directement leur durée de vie en conditions réelles. La présente norme ne s'applique pas à l'évaluation de la résistance à la corrosion des matériaux non métalliques.

2 Références normatives

Les clauses énumérées dans les documents suivants deviennent les clauses de la présente norme par référence. Pour les documents référencés avec date, seules les versions référencées s'appliquent ; pour les documents référencés sans date, les versions les plus récentes (y compris tous les amendements) s'appliquent.

ISO 1514:2016 Peintures et vernis — Panneaux d'essai normalisés pour essais

ISO 2808:2019 Peintures et vernis — Détermination de l'épaisseur du film

ISO 3574:2012 Tôles et feuillards en acier au carbone laminés à froid — Spécifications

Exigences générales relatives à la compétence des laboratoires d'essais et d'étalonnage

3 Termes et définitions

Les termes et définitions suivants s'appliquent au présent document :

Essai au brouillard salin : Dans des conditions contrôlées, une solution saline est dispersée en fines gouttelettes à travers un dispositif de pulvérisation pour former une atmosphère corrosive artificielle afin d'évaluer la résistance à la corrosion d'un matériau.

NSS (Neutral Salt Spray Test) : test au brouillard salin réalisé à l'aide d'une solution saline neutre (pH 6,5-7,2).

AASS (test de brouillard salin d'acide acétique) : test de brouillard salin réalisé en ajoutant de l'acide acétique à une solution saline neutre et en ajustant le pH à 3,1-3,3.

L'ajout de chlorure (CuCl_2) à la solution d'essai au brouillard salin d'acétate accélère le test de corrosion.

Perte de poids : Variation de masse d'un échantillon avant et après un test, généralement exprimée en mg/cm^2 .

4 Principe du test

L'essai au brouillard salin simule les conditions de corrosion en milieu marin ou industriel en exposant l'échantillon à une atmosphère artificielle contenant des gouttelettes de sel. L'essai NSS

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

simule un environnement de brouillard salin neutre, tandis que les essais AASS et CASS accélèrent la corrosion par acidification et ajout de catalyseurs (tels que CuCl_2), qui conviennent aux évaluations de performance à la corrosion plus exigeantes. La vitesse de corrosion est évaluée par perte de poids, analyse des produits de corrosion ou défauts de surface (tels que piqûres et écaillage).

5 Équipements de test

5.1 Chambre d'essai au brouillard salin

Volume ≥ 400 L, assurant un flux d'air uniforme autour de l'échantillon.

Le corps de la boîte est fabriqué dans un matériau résistant à la corrosion (tel que du plastique renforcé de fibres de verre) pour éviter la pollution des matériaux métalliques.

Equippé d'un dispositif de pulvérisation, d'un système de chauffage et d'un système de contrôle de l'humidité.

5.2 Dispositif de pulvérisation

Le matériau de la buse est un matériau résistant à la corrosion (tel que le polytétrafluoroéthylène).

Pression de pulvérisation : 0,07-0,17 MPa (0,7-1,7 bar).

Taille des gouttelettes de pulvérisation : 1 à 10 μm .

5.3 Contrôle environnemental

Température dans la chambre d'essai :

NSS : $35^\circ\text{C} \pm 2^\circ\text{C}$.

AASS et CASS : $50^\circ\text{C} \pm 2^\circ\text{C}$.

Humidité : $\geq 95\%$ HR.

6 Solution de test

6.1 Solution de test NSS

Concentration en chlorure de sodium (NaCl) : $50\text{ g/L} \pm 5\text{ g/L}$.

pH : 6,5-7,2 (à 25°C).

Pureté de la solution : Impuretés (telles que Cu, Ni) $< 0,001\%$.

6.2 Solution de test AASS

Ajoutez de l'acide acétique glacial à la solution NSS et ajustez le pH à 3,1-3,3 (à 25°C).

6.3 Solution de test CASS

$\text{CuCl}_2 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ à la solution AASS à une concentration de $0,26\text{ g/L} \pm 0,02\text{ g/L}$.

pH : 3,1-3,3 (à 25°C).

6.4 Collecte de solutions

Débit de collecte : 1,0-2,0 mL/h (surface horizontale de 80 cm^2).

Solution de collecte Concentration en NaCl : $50\text{ g/L} \pm 10\text{ g/L}$.

7. Exigences relatives à l'échantillon

7.1 Type d'échantillon

Matériaux métalliques, matériaux revêtus ou composants, de dimensions adaptées à la chambre d'essai (recommandé $150\text{ mm} \times 70\text{ mm} \times 1\text{ mm}$).

La rugosité de surface de l'échantillon de carbure cémenté est $R_a \leq 0,2\text{ }\mu\text{m}$.

7.2 Nombre d'échantillons

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

Au moins 3 échantillons ont été inclus dans chaque groupe pour garantir la fiabilité statistique.

7.3 Préparation des échantillons

Nettoyer l'échantillon pour éliminer l'huile et les oxydes (peut être nettoyé avec de l'éthanol anhydre). Les bords des échantillons doivent être lisses pour éviter les arêtes vives et les coins qui peuvent provoquer une corrosion locale.

Enregistrer la masse initiale de l'échantillon (précision $\pm 0,001$ g).

7.4 Placement des échantillons

L'échantillon est placé à un angle de 15° - 30° par rapport à la verticale.

La distance entre les échantillons doit être ≥ 20 mm pour garantir que les gouttelettes ne coulent pas les unes sur les autres.

8 Procédures de test

8.1 Conditions d'essai

NSS : $35^{\circ}\text{C} \pm 2^{\circ}\text{C}$, pH 6,5-7,2.

AASS : $50^{\circ}\text{C} \pm 2^{\circ}\text{C}$, pH 3,1-3,3.

CASS : $50^{\circ}\text{C} \pm 2^{\circ}\text{C}$, pH 3,1-3,3, avec CuCl_2 .

8.2 Durée du test

Cycles de test recommandés : 24 h, 48 h, 96 h, 240 h, 720 h (à sélectionner en fonction des exigences de l'application).

720 h sont recommandés pour le carbure cémenté afin d'évaluer la résistance à la corrosion à long terme.

8.3 Test de fonctionnement

Préchauffer la chambre d'essai à la température spécifiée. Ajouter la solution d'essai et démarrer le pulvérisateur. Placer l'échantillon, fermer la chambre d'essai et noter l'heure de début de l'essai. Vérifier le pH de la solution et le débit de collecte toutes les 24 heures.

8.4 Fin du test

Les échantillons ont été retirés et rincés à l'eau distillée pour éliminer les dépôts de sel.

Laver à l'éthanol anhydre et sécher ($60^{\circ}\text{C} \pm 5^{\circ}\text{C}$, 30 min).

Enregistrer la masse finale de l'échantillon (précision $\pm 0,001$ g).

9 Évaluation des résultats

9.1 Calcul de la perte de poids

Taux de perte de poids (mg/cm^2) = (masse initiale - masse finale) / surface de l'échantillon.

cm^2 après 720 h de NSS $\pm 0,01$ mg/cm^2 .

9.2 Analyse de surface

Utilisez un microscope optique (grossissement $50\times$ - $200\times$) pour observer les piqûres, l'écaillage ou les produits de corrosion.

Enregistrez le nombre, la taille (diamètre, profondeur) et la répartition des piqûres de corrosion.

9.3 Critères d'évaluation

Selon les exigences de l'application, les normes qualifiées de taux de perte de poids ou de défauts de surface sont établies.

Par exemple : perte de poids du carbure de valve chimique $< 0,1$ mg/cm^2 , profondeur de piqûre $<$

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

5 μ m .

10 Rapport de test

Le rapport de test doit inclure les éléments suivants :
Informations sur l'échantillon : type de matériau, taille, état de surface.
Conditions de test : type de test (NSS/AASS/CASS), température, pH, durée du test.
Résultats : taux de perte de poids, nombre et taille des piqûres de corrosion, photos de surface.
Conclusion de l'évaluation : si le projet répond aux exigences de la candidature.
Date du test et signature de l'opérateur.

Annexe A (Annexe informative) Valeurs de référence de la résistance au brouillard salin des matériaux typiques

Type de matériau	Type de test	Durée du test (h)	Taux de perte de poids (mg/cm²)	Applications typiques
Carbure cémenté (WC-10Co)	NSS	720	0,08 ± 0,01	Équipement marin
Tôle d'acier galvanisée	AASS	240	0,15 ± 0,02	Composants de construction
Acier inoxydable (304)	CASS	96	0,05 ± 0,01	Équipement de transformation des aliments

Annexe B (Annexe informative) Exigences environnementales

Température de la chambre d'essai : 15°C à 35°C, 23±2°C recommandé.
Humidité : 30%-70%, 50±10% recommandé.
Aucune vibration, aucun environnement de gaz corrosif.
Planéité du banc d'essai : écart < 0,02 mm/m.

Résumer

La norme ISO 9227:2017 « Essais de corrosion – Essais au brouillard salin en atmosphère artificielle » fournit des méthodes normalisées pour évaluer la résistance à la corrosion des matériaux métalliques et des revêtements de protection, comprenant trois types d'essais : NSS, AASS et CASS. Grâce à des conditions et procédures d'essai normalisées, les performances des matériaux dans des environnements corrosifs simulés peuvent être efficacement comparées, fournissant ainsi une base scientifique pour le choix des matériaux et les applications techniques (comme l'utilisation du carbure cémenté dans les équipements marins).

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

appendice:

Norme nationale de la République populaire de Chine
GB/T 18376-2014 Méthodes d'essai de la résistance à la corrosion et à l'usure des carbures
cémentés

Préface

Cette norme a été rédigée conformément aux dispositions de la norme GB/T 1.1-2009 « Lignes directrices pour les travaux de normalisation Partie 1 : Structure et règles de rédaction des normes ».

Cette norme remplace la norme GB/T 18376-2001 « Méthodes d'essai pour la résistance à la corrosion et à l'usure du carbure cimenté ».

Par rapport à la norme GB/T 18376-2001, les principales modifications techniques sont les suivantes :

Méthode d'essai électrochimique ajoutée (voir 5.3) ;

Les conditions de l'essai au brouillard salin ont été ajustées et la température a été modifiée de 40°C à 35°C ± 2°C (voir 5.1) ;

La charge et le nombre de cycles de l'essai d'usure par abrasion ont été modifiés. La charge est passée de 30 N à 20 N ± 0,5 N, et le nombre de cycles est passé de 500 à 1 000 ± 10 (voir 6.2).

L'exigence de rugosité de surface de l'échantillon est augmentée à Ra < 0,8 µm ± 0,1 µm (voir 4.2).

Cette norme est proposée et gérée par le Comité technique national de normalisation du carbure cimenté (SAC/TC 357).

Les unités de rédaction de cette norme sont : l'Institut de recherche sur le carbure cimenté de la China Machine Tool Corporation, l'Université des sciences et technologies de Pékin et l'Université Jiaotong de Xi'an .

Les principaux rédacteurs de cette norme sont : Cette norme entrera en vigueur le 1er octobre 2014.

1 Portée

La présente norme spécifie les méthodes d'essai de résistance à la corrosion et à l'usure des carbures cimentés. Elle s'applique aux carbures cimentés dont le composant principal est le carbure de tungstène (WC) et la phase de liaison est le cobalt (Co) ou le nickel (Ni), y compris, mais sans s'y limiter, les systèmes WC-Co et WC-Ni.

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 12444-2006 Méthodes d'essai pour le frottement de glissement et l'usure des matériaux métalliques

GB/T 16545-2008 Méthode d'essai de corrosion par brouillard salin pour les matériaux métalliques

ISO 9227-2017 Essai de corrosion - Corrosivité en atmosphère artificielle

3 Termes et définitions

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

Français Les termes et définitions suivants s'appliquent à la présente norme :

3.1 Résistance à la corrosion

Capacité du carbure cimenté à résister à la perte de masse ou aux dommages de surface dans des milieux corrosifs (tels que des solutions acides ou un brouillard salin), généralement exprimée en taux de perte de poids (mg/cm^2) et en densité de courant de corrosion (i_{corr} , A/cm^2).

3.2 Résistance à l'usure Capacité du carbure cimenté à résister à l'usure du matériau sous l'effet d'un frottement mécanique ou d'une action abrasive, généralement exprimée en perte de masse par usure (mg) ou en volume d'usure (mm^3). 3.3 Densité de courant de corrosion (i_{corr})

Dans les tests électrochimiques, il s'agit d'un paramètre reflétant la vitesse de corrosion du matériau, avec l'unité A/cm^2 .

4 Préparation expérimentale

4.1 Échantillon

4.1.1 Matériau de l'échantillon : carbure cimenté à base de WC, avec Co ou Ni comme phase de liaison, et la composition doit répondre aux exigences techniques du produit.

4.1.2 Taille de l'échantillon : $10 \text{ mm} \times 10 \text{ mm} \times 5 \text{ mm} \pm 0,1 \text{ mm}$. 4.1.3 Nombre d'échantillons : Chaque groupe de tests doit être répété plus de 3 fois.

4.2 Traitement des échantillons

4.2.1 Traitement de surface : La surface de l'échantillon est polie mécaniquement, avec une rugosité de $R_a < 0,8 \mu\text{m} \pm 0,1 \mu\text{m}$.

4.2.2 Nettoyage : Nettoyage par ultrasons à l'éthanol anhydre pendant 5 minutes $\pm 0,5$ minute, séchage avant utilisation. 4.2.3 Masse initiale : Mesurée avec une balance analytique, avec une précision de $\pm 0,01 \text{ mg}$.

5 Test de résistance à la corrosion

5.1 Essai au brouillard salin

5.1.1 Conditions d'essai :

Solution : solution de NaCl à $5 \% \pm 0,1 \%$ (fraction massique), pH 6,5-7,2.

Température : $35^\circ\text{C} \pm 2^\circ\text{C}$.

Durée : 48 heures ± 2 heures.

5.1.2 Équipement d'essai

Chambre de brouillard salin, volume de pulvérisation $1-2 \text{ mL} / (80 \text{ cm}^2 \cdot \text{h})$.

5.1.3 Évaluation des résultats :

Taux de perte de poids = $(m_0 - m_1) / A$, unité : mg/cm^2 , précision : $\pm 0,01 \text{ mg}/\text{cm}^2$, où m_0 est la masse avant le test, m_1 est la masse après le test et A est la surface de l'échantillon.

Observez la morphologie de la corrosion de surface et enregistrez la profondeur de la piqure de corrosion (précision $\pm 0,5 \mu\text{m}$).

5.2 Essai d'immersion dans l'acide

5.2.1 Conditions d'essai :

Solution : solution H_2SO_4 à $1 \% \pm 0,1 \%$ (fraction volumique).

Température : $25^\circ\text{C} \pm 1^\circ\text{C}$.

Temps d'immersion : 24 heures ± 1 heure.

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

5.2.2 Équipement d'essai

Bain-marie à température constante.

5.2.3 Évaluation des résultats :

Le taux de perte de poids est calculé selon 5.1.3.

Mesurer la profondeur des piqûres de corrosion avec une précision de $\pm 0,5 \mu\text{m}$.

5.3 Essais électrochimiques

5.3.1 Conditions d'essai :

Électrolyte : solution de NaCl à $3,5 \% \pm 0,1 \%$, température $25^\circ\text{C} \pm 1^\circ\text{C}$.

Système d'électrodes : électrode de travail (alliage dur), électrode de référence (électrode au calomel saturé SCE), électrode auxiliaire (électrode en platine).

Taux de balayage : $1 \text{ mV/s} \pm 0,1 \text{ mV/s}$, plage de potentiel $\pm 0,25 \text{ V}$ par rapport à E_{corr} .

5.3.2 Équipement d'essai

Poste de travail électrochimique, précision du potentiel $\pm 0,001 \text{ V}$, précision du courant $\pm 10^{-9} \text{ A}$.

5.3.3 Évaluation des résultats :

Mesure le potentiel de corrosion (E_{corr} , précision $\pm 0,02 \text{ V}$) et la densité de courant de corrosion (i_{corr} , précision $\pm 10^{-7} \text{ A/cm}^2$).

Une analyse d'ajustement de Tafel a été utilisée et le test a été répété ≥ 3 fois.

6 Test de résistance à l'usure

6.1 Essai de frottement et d'usure

6.1.1 Conditions d'essai :

Charge : $50 \text{ N} \pm 1 \text{ N}$.

Vitesse de glissement : $0,1 \text{ m/s} \pm 0,01 \text{ m/s}$.

Durée du test : $30 \text{ minutes} \pm 1 \text{ minute}$.

Paire de friction : goupille en carbure, le matériau apparié est un disque en acier trempé (dureté HV 600 ± 50).

6.1.2 Équipement d'essai

Machine d'essai de frottement et d'usure, précision de charge $\pm 1 \text{ N}$, précision de vitesse $\pm 0,01 \text{ m/s}$.

6.1.3 Évaluation des résultats :

Perte de masse d'usure = $m_0 - m_1$, unité : mg, précision : $\pm 0,01 \text{ mg}$.

Observez la profondeur et la largeur des cicatrices d'usure avec une précision de $\pm 0,5 \mu\text{m}$.

6.2 Essai d'usure abrasive

6.2.1 Conditions d'essai :

Abrasif : SiC, granulométrie $100-150 \mu\text{m}$.

Charge : $20 \text{ N} \pm 0,5 \text{ N}$.

Nombre de cycles de test : $1000 \text{ cycles} \pm 10 \text{ cycles}$.

Paire de frottement : éprouvette en carbure, le matériau d'accouplement est un disque abrasif.

6.2.2 Équipement d'essai

Machine d'essai d'usure abrasive, précision de charge $\pm 0,5 \text{ N}$, précision de cercle ± 10 cercles.

6.2.3 Évaluation des résultats :

Volume d'usure = $(m_0 - m_1) / \rho$, unité : mm^3 , précision : $\pm 0,01 \text{ mm}^3$, où ρ est la densité du matériau, précision : $\pm 0,1 \text{ g/cm}^3$.

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

Mesurez le profil de cicatrice d'usure avec une précision de $\pm 0,5 \mu\text{m}$.

7 Traitement des données

7.1 Tous les résultats des tests sont la moyenne de plus de 3 mesures.

7.2 La résistance à la corrosion est exprimée en taux de perte de poids (mg/cm^2 , précision $\pm 0,01 \text{ mg}/\text{cm}^2$) et i_{corr} (A/cm^2 , précision $\pm 10^{-7} \text{ A}/\text{cm}^2$).

7.3 La résistance à l'usure est exprimée en perte de masse par usure (mg , précision $\pm 0,01 \text{ mg}$) ou en volume d'usure (mm^3 , précision $\pm 0,01 \text{ mm}^3$).

7.4 Les résultats sont accompagnés d'une analyse d'incertitude avec un niveau de confiance de 95 %.

8 Rapport d'essai

Le rapport de test doit inclure les éléments suivants :

Composition de l'échantillon de matériau et processus de préparation.

Conditions de test (telles que température, temps, charge, etc.).

Résultats des tests (perte de poids, i_{corr} , perte d'usure, etc.) et incertitudes.

Date du test et signature de l'opérateur.

Annexe A (Annexe normative)

Exemple de préparation d'échantillons

A.1 Découpe d'échantillon : Utiliser une meule diamantée, de l'eau comme liquide de refroidissement, vitesse de coupe $10 \text{ m/s} \pm 1 \text{ m/s}$.

A.2 Polissage : Utiliser du papier de verre SiC (grain #800-#1200), et enfin polir avec une suspension diamantée (grain $1 \mu\text{m} \pm 0,1 \mu\text{m}$).

A.3 Nettoyage : Nettoyage par ultrasons pendant 5 minutes $\pm 0,5$ minute, peser après séchage.

Annexe B (Annexe informative)

Référence de données typique

B.1 WC10Ni : Taux de perte de poids au brouillard salin $0,04 \text{ mg}/\text{cm}^2 \pm 0,01 \text{ mg}/\text{cm}^2$, i_{corr} $10^{-6} \text{ A}/\text{cm}^2 \pm 10^{-7} \text{ A}/\text{cm}^2$, perte de masse par usure $0,08 \text{ mg} \pm 0,01 \text{ mg}$.

B.2 WC10 Co : Taux de perte de masse par brouillard salin $0,07 \text{ mg}/\text{cm}^2 \pm 0,01 \text{ mg}/\text{cm}^2$, i_{corr} $10^{-5} \text{ A}/\text{cm}^2 \pm 10^{-6} \text{ A}/\text{cm}^2$, perte de masse d'usure $0,12 \text{ mg} \pm 0,01 \text{ mg}$.

Pour

les questions non traitées dans cette norme, veuillez vous référer aux normes internationales pertinentes (telles que ISO 3738 et ISO 28079) ou consulter le comité technique. Cette norme a été publiée par l'Administration nationale de normalisation (National Standardization Administration) le 9 juillet 2014 et est entrée en vigueur le 1er octobre 2014.

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

appendice:

Norme internationale

ISO 4287:1997 Spécifications géométriques des produits

— Texture de surface : méthode des contours

— Termes, définitions et paramètres de texture de surface

Spécifications géométriques des produits (GPS)

— Texture de surface : méthode du profil

— Termes, définitions et paramètres de texture de surface

Aperçu

L'ISO 4287:1997 est une norme élaborée par l'Organisation internationale de normalisation (ISO) et intitulée « Spécification géométrique des produits (GPS) — État de surface : Méthode du profil — Termes, définitions et paramètres d'état de surface ». La norme a été publiée le 1er août 1997. La dernière version, l'ISO 4287:1997 (Amd. 1:2009), est en vigueur depuis 2018. L'ISO 4287 a été élaborée par l'ISO/TC 213 (Spécification géométrique des produits et vérification) afin de fournir des termes, définitions et paramètres unifiés pour la méthode du profil d'état de surface, applicable à l'évaluation de la qualité de surface des pièces mécaniques, des outils et des matériaux. Cette norme est largement utilisée en fabrication, en contrôle qualité et en conception technique.

1 Portée

Objets applicables : Applicable aux pièces qui mesurent et évaluent la texture de surface à l'aide de la méthode de profil, y compris les métaux, les plastiques et les céramiques.

Objectif : Définir la terminologie et les méthodes de calcul des paramètres de texture de surface et fournir des conseils pour la mesure et le rapport de la rugosité de surface.

Non applicable : Non applicable à la mesure non profilée de la topographie de surface (comme la méthode de surface) ou à l'analyse de la microstructure.

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 3274:1996 Spécification géométrique des produits (GPS)

— Texture de surface : Méthode du profil — Caractéristiques nominales des instruments de contact (stylet)

ISO 4288:1996 Spécification géométrique des produits (GPS)

— Texture de surface : Méthode du profil — Règles et procédures pour l'évaluation de la texture de surface

3 Termes et définitions

Les termes et définitions suivants s'appliquent à la présente norme :

3.1 Concepts de base

3.1.1 Texture de surface

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

La surface d'une pièce est la somme de sa rugosité, de son ondulation et de son erreur de forme.

3.1.2 Profil

La section transversale bidimensionnelle de la texture de surface, représentant la courbe de la hauteur par rapport à la longueur.

3.2 Paramètres de rugosité

3.2.1 Ra (Écart moyen arithmétique)

Profil Écart moyen arithmétique, défini comme la moyenne des valeurs absolues de l'écart du profil dans la longueur d'échantillonnage, en μm (micromètres).

3.2.2 Rq (Écart quadratique moyen)

Profil Écart quadratique moyen, défini comme la racine carrée de la moyenne des carrés de l'écart du profil dans la longueur d'échantillonnage, en μm (micromètres).

3.2.3 Rz (Hauteur maximale du profil)

Hauteur maximale du profil, définie comme la différence de hauteur entre le pic le plus élevé et la vallée la plus basse dans la longueur d'échantillonnage, en μm (micromètres).

3.2.4 Rt (Hauteur totale du profil)

Hauteur totale du profil, définie comme la différence de hauteur maximale entre le pic le plus élevé et la vallée la plus basse dans la longueur d'évaluation, en μm (micromètres).

3.2.5 Rp (Hauteur maximale du pic de profil)

Hauteur du pic dans la longueur d'échantillonnage, en μm (micromètres).

3.2.6 Rv (profondeur maximale de la vallée du profil) est

la profondeur de vallée la plus profonde dans la longueur d'échantillonnage, en μm (micromètres).

3.3 Durées d'échantillonnage et d'évaluation

3.3.1 Longueur d'échantillonnage (lr)

La longueur de référence utilisée pour calculer les paramètres de rugosité, généralement 0,25 mm, 0,8 mm ou 2,5 mm.

3.3.2 Longueur d'évaluation (ln)

La somme de plusieurs longueurs d'échantillonnage, utilisée pour une évaluation complète de la texture de surface, généralement 5 lr.

3.3.3 Longueur de traversée (lt)

La longueur totale réellement balayée pendant le processus de mesure, généralement 1,5 ln.

3.4 Autres paramètres

3.4.1 Sk (Profondeur de rugosité du noyau)

Profil La profondeur de rugosité du noyau reflète les propriétés portantes du matériau, l'unité est le μm (micromètres).

3.4.2 Rsk (Asymétrie)

Profil L'asymétrie décrit l'asymétrie de la distribution de hauteur, l'unité n'est pas spécifiée.

3.4.3 Rku (Aplatissement) Profil

L'aplatissement décrit la netteté de la distribution de hauteur, l'unité n'est pas spécifiée.

4 méthodes de calcul des paramètres

4.1 Paramètres de rugosité

Calcul de Ra :

$$Ra = \frac{1}{lr} \int_0^{lr} |z(x)| dx$$

其中, $z(x)$ 为轮廓偏差 (Profile deviation), lr 为采样长度 (Sampling length)。

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

Rq 计算 (Calculation of Rq):

$$Rq = \sqrt{\frac{1}{lr} \int_0^{lr} z(x)^2 dx}$$

Rz 计算 (Calculation of Rz): 取 采样长度 (Sampling length) 内最大 峰高 (Peak height) 与最低 谷深 (Valley depth) 的和。

Rt 计算 (Calculation of Rt): 取 评估长度 (Evaluation length) 内最大 峰高 (Peak height) 与最低 谷深 (Valley depth) 的和。

4.2 Conditions de mesure

Instrument : Instrument de contact (styllet) conforme à la norme ISO 3274, avec un rayon de styllet $\leq 5 \mu m$.

Filtrage : utilisez un filtrage passe-haut pour supprimer l'effet d'ondulation. La longueur d'onde de coupure λ_c est généralement de 0,8 mm.

5 Exigences en matière de rapports

Valeurs des paramètres : Rapport Ra, Rq, Rz et autres valeurs de paramètres (valeurs des paramètres), l'unité est μm (micromètres), la précision est de $\pm 0,01 \mu m$.

Conditions de mesure : y compris la longueur d'échantillonnage, la longueur d'évaluation, les conditions de filtrage et le type de styllet.

Incertitude : L'incertitude de mesure est fournie avec un niveau de confiance de 95 %.

6 Annexe

Annexe A : Données typiques

Pièce en acier usinée : Ra = $0,8 \mu m \pm 0,01 \mu m$, Rz = $4,5 \mu m \pm 0,1 \mu m$.

Carbure cimenté poli : Ra = $0,02 \mu m \pm 0,01 \mu m$, Rz = $0,15 \mu m \pm 0,01 \mu m$.

Annexe B : Exemple de mesure

La longueur d'échantillonnage est de 0,8 mm, la longueur d'évaluation est de 4 mm et la valeur de mesure Ra est de $1,2 \mu m$.

illustrer

Normes connexes : L'ISO 3274 spécifie les caractéristiques des instruments de mesure. L'ISO 4288 fournit des règles et des procédures pour l'évaluation de la texture de surface.

Validité : ISO 4287:1997 (Amd 1:2009) confirmée comme valide en 2018, peut être mise à jour à l'avenir en fonction du cadre GPS.

Où l'obtenir : Le texte standard peut être acheté sur le site officiel de l'ISO.

Remarque : lors de la mise en œuvre, il est nécessaire de combiner le processus de traitement de surface spécifique et l'étalonnage de l'équipement de mesure, et de consulter des techniciens professionnels.

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

appendice:

Norme internationale

ISO 3274:1996 Spécifications géométriques des produits (GPS)

— Texture de surface : méthode des contours

Spécifications géométriques des produits (GPS) pour les instruments de contact

— Texture de surface : méthode du profil

— Caractéristiques nominales des instruments de contact (stylet)

Aperçu

L'ISO 3274:1996 est une norme élaborée par l'Organisation internationale de normalisation (ISO) et intitulée « Spécifications géométriques des produits – État de surface : Méthode du profil – Caractéristiques nominales des instruments de contact ». Publiée le 1er août 1996, la dernière version est l'ISO 3274:1996 (Amd. 1:2009), dont la validité a été confirmée en 2019. L'ISO 3274 a été élaborée par l'ISO/TC 213 (Spécifications et vérification géométriques des produits) afin de spécifier les caractéristiques nominales des instruments de contact utilisés pour la mesure de la profilométrie de l'état de surface, notamment les sondes, les dispositifs d'entraînement et les exigences relatives aux filtres. Cette norme fournit une base technique pour la mesure de la rugosité de surface et est largement utilisée dans les domaines de la fabrication, de la construction mécanique et des essais de matériaux.

1 Portée

Applicable à : Profilométrie pour la mesure de la texture de surface à l'aide d'instruments de contact, couvrant des matériaux tels que les métaux, les plastiques et les céramiques.

Objectif : Définir les caractéristiques nominales des instruments de contact pour assurer la comparabilité et la cohérence des résultats de mesure.

Non applicable : Ne convient pas à une utilisation avec des instruments de mesure sans contact (tels que des équipements optiques ou laser) ou pour l'analyse microstructurale.

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 4287:1997 Spécification géométrique des produits — État de surface : Méthode du profil — Termes, définitions et paramètres d'état de surface

ISO 4288:1996 Spécification géométrique des produits — État de surface : Méthode du profil — Règles et procédures pour l'évaluation de l'état de surface

3 Termes et définitions

Les termes et définitions suivants s'appliquent à la présente norme :

3.1 Instrument de contact

Un dispositif qui utilise une sonde physique pour entrer en contact avec la surface pour la mesure,

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

utilisé pour obtenir des données de profil de surface. 3.2 La partie à l'extrémité de l'instrument de sonde qui entre en contact avec la surface et est responsable de la détection des changements de hauteur. 3.3 **Longueur d'échantillonnage**

La longueur de référence utilisée pour mesurer la texture de la surface, généralement 0,25 mm, 0,8 mm ou 2,5 mm. 3.4 **Filtre de longueur d'onde de coupure**

La longueur critique utilisée pour séparer la rugosité et l'ondulation, une valeur courante est de 0,8 mm.

4 Exigences relatives aux caractéristiques de l'instrument

4.1 Sonde

Forme : Pointe conique ou sphérique, rayon de la pointe généralement de 2 μm à 10 μm .

Matériaux : Matériaux résistants à l'usure tels que le diamant ou le carbure.

Force de contact : 0,5 mN à 4 mN, selon la dureté et la rugosité de la surface.

4.2 Dispositif d'entraînement

Vitesse de déplacement : 0,1 mm/s à 1 mm/s, précision $\pm 0,02$ mm/s.

Rectitude : L'erreur de rectitude du trajet de déplacement est $\leq 0,5 \mu\text{m}$.

Résolution : résolution en hauteur $\leq 0,01 \mu\text{m}$, résolution en longueur $\leq 0,1 \mu\text{m}$.

4.3 Filtres

Type : filtre passe-haut 2RC ou corrigé en phase.

Longueur d'onde de coupure (λ_c) : 0,08 mm, 0,25 mm, 0,8 mm ou 2,5 mm, sélectionnez en fonction des exigences de mesure.

Caractéristiques de transfert : conformes aux exigences de la norme ISO 11562, taux d'atténuation $\geq 75\%$.

5 Conditions de mesure

Conditions environnementales : température $20^\circ\text{C} \pm 2^\circ\text{C}$, humidité 40%-60%.

Préparation de la surface : La surface de l'échantillon doit être propre, exempte d'huile et de saleté, avec une rugosité de $R_a \leq 0,8 \mu\text{m}$.

Sens de mesure : mesurer le long de la direction principale de traitement ou de la direction verticale de la pièce.

6 Collecte et traitement des données

Intervalle d'échantillonnage : ajusté automatiquement en fonction de la longueur d'échantillonnage, l'intervalle maximal est $\leq 0,1 \mu\text{m}$.

Nombre de points de données : Au moins 5 000 points de données par longueur d'échantillonnage.

Filtrage : utilisez une longueur d'onde de coupure spécifiée pour supprimer les effets d'ondulation.

7 Rapport de test

Le rapport de test doit inclure les éléments suivants :

Matériau de l'échantillon et état de surface.

Modèle d'instrument, type de sonde et force de contact.

Conditions de mesure (par exemple longueur d'échantillonnage, longueur d'onde de coupure).

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

Résultats de mesure et incertitudes.

Date du test et signature de l'opérateur.

8 Annexe (informative)

Annexe A : Données typiques

Pièces usinées en acier : rayon de sonde 5 μm , longueur d'échantillonnage 0,8 mm, $R_a = 0,8 \mu\text{m}$.

Polissage carbure : rayon de sonde 2 μm , longueur d'échantillonnage 0,25 mm, $R_a = 0,02 \mu\text{m}$.

illustrer

Normes connexes :

La norme ISO 4287 fournit des définitions des paramètres de texture de surface.

La norme ISO 4288 fournit des règles et des procédures d'évaluation.

Validité : La norme ISO 3274:1996 (Amd 1:2009) a été confirmée comme valide en 2019 et peut être mise à jour à l'avenir en fonction des avancées technologiques.

Où l'obtenir : Le **texte standard** peut être acheté sur le site officiel de l'ISO.

Remarque : lors de la mise en œuvre, l'instrument doit être étalonné et des techniciens professionnels doivent être consultés en fonction des exigences de mesure spécifiques.

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

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

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

appendice

Norme internationale

ISO 4288:1996 Spécifications géométriques des produits

— Texture de surface : méthode des contours

— Règles et procédures d'évaluation de la texture de surface

Spécifications géométriques des produits

— Texture de surface : méthode du profil

— Règles et procédures pour l'évaluation de la texture de surface

Aperçu

L'ISO 4288:1996 est une norme élaborée par l'Organisation internationale de normalisation (ISO) et intitulée « Spécifications géométriques des produits – État de surface : Méthode du profil – Règles et procédures d'évaluation de l'état de surface ». Publiée le 1er août 1996, la dernière version est l'ISO 4288:1996 (Amd. 1:2003), dont la validité a été confirmée en 2018. L'ISO 4288 a été élaborée par l'ISO/TC 213 (Spécifications géométriques des produits et vérification) afin de fournir des règles et procédures d'évaluation de l'état de surface par la méthode du profil, incluant les conditions de mesure, le traitement des données et la communication des résultats. Cette norme s'applique au contrôle de la qualité de surface des pièces mécaniques, des outils et des matériaux, et est largement utilisée dans les secteurs de la fabrication et de l'ingénierie.

1 Portée

Objets applicables : Convient aux pièces qui mesurent et évaluent la texture de surface par profilométrie, y compris les matériaux métalliques, plastiques et céramiques.

Objectif : Spécifier les règles et procédures d'évaluation de la texture de surface afin de garantir la cohérence et la comparabilité des résultats de mesure.

Non applicable : Non applicable aux méthodes sans contour (par exemple les méthodes planimétriques) ou à l'analyse microstructurale.

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 3274:1996 Spécification géométrique des produits — État de surface : Profilométrie — Caractéristiques nominales des instruments de contact

ISO 4287:1997 Spécification géométrique des produits — État de surface : Méthode du profil — Termes, définitions et paramètres d'état de surface

3 Termes et définitions

Les termes et définitions suivants s'appliquent à la présente norme :

3.1 Texture de surface

La somme de la rugosité, de l'ondulation et de la morphologie d'erreur de la surface de la pièce. 3.2

Profil

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

Une section transversale bidimensionnelle de la texture de surface, représentant une courbe de hauteur en fonction de la longueur.

3.3 Longueur d'échantillonnage L_a

longueur de référence utilisée pour calculer les paramètres de rugosité, généralement 0,25 mm, 0,8 mm ou 2,5 mm.

3.4 Longueur d'évaluation

La somme de plusieurs longueurs d'échantillonnage, utilisée pour une évaluation complète de la texture de surface, généralement 5 L_a .

4 Conditions de mesure

4.1 Instrument

Pour les instruments de contact conformes à la norme ISO 3274, le rayon de la sonde est généralement compris entre 2 μm et 10 μm .

Vitesse de déplacement : 0,1 mm/s à 1 mm/s, précision $\pm 0,02$ mm/s.

4.2 Conditions environnementales

Température : $20^\circ\text{C} \pm 2^\circ\text{C}$.

Humidité : 40%-60%.

Évitez les vibrations et les interférences électromagnétiques.

4.3 Préparation de la surface

La surface de l'échantillon est propre, exempte d'huile et de saleté, et la rugosité $R_a \leq 0,8 \mu\text{m}$.

Direction de mesure : Le long de la direction principale de traitement ou perpendiculairement à celle-ci.

5 règles d'évaluation

5.1 Sélection de la longueur d'échantillonnage

Sélectionnez la longueur d'échantillonnage en fonction des caractéristiques de la texture de la surface :

Surface fine : 0,25 mm.

Surface générale : 0,8 mm.

Surface rugueuse : 2,5 mm.

5.2 Filtrage

Un filtre passe-haut est utilisé avec une longueur d'onde de coupure λ_c généralement de 0,8 mm.

Conforme aux exigences de correction de phase de la norme ISO 11562 avec une atténuation $\geq 75\%$.

5.3 Traitement des données

Paramètres de rugosité : calculer R_a , R_q , R_z et d'autres paramètres.

Traitement des valeurs aberrantes : éliminer les données manifestement anormales et effectuer de nouvelles mesures.

Incertitude : Évalue l'erreur causée par l'équipement de mesure et le fonctionnement, avec un niveau de confiance de 95 %.

6 Procédure d'évaluation

Étape de préparation : calibrer l'instrument et nettoyer la surface de l'échantillon.

Phase de mesure : Numérisez le long de la direction spécifiée et enregistrez les données de contour.

Phase d'analyse : Appliquer le filtrage et calculer les valeurs des paramètres.

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

Phase de reporting : Enregistrer les résultats et comparer avec les exigences de tolérance.

7 Rapport de test

Le rapport de test doit inclure les éléments suivants :

Matériau de l'échantillon et état de surface. Conditions de mesure (par exemple, longueur d'échantillonnage, longueur d'onde de coupure, direction de mesure).

Valeurs et incertitudes des paramètres de texture de surface. Date de l'essai et signature de l'opérateur.

8 Annexe (informative)

Annexe A : Données typiques

Pièces usinées en acier : longueur d'échantillonnage 0,8 mm, $R_a = 0,8 \mu m$, $R_z = 4,5 \mu m$.

Carbure poli : longueur d'échantillonnage 0,25 mm, $R_a = 0,02 \mu m$, $R_z = 0,15 \mu m$.

Annexe B : Exemples de mesure La longueur d'évaluation était de 4 mm, la longueur d'onde de coupure était de 0,8 mm et la valeur mesurée de R_a était de $1,2 \mu m$.

illustrer

Normes concernées : L'ISO 3274 spécifie les caractéristiques nominales des instruments de contact. L'ISO 4287 fournit des définitions des paramètres de texture de surface.

Validité : ISO 4288:1996 (Amd 1:2003) Confirmée valide en 2018, peut être mise à jour à l'avenir en fonction du cadre GPS.

l'obtenir : Le texte standard peut être acheté sur le site officiel de l'ISO.

Remarque : lors de la mise en œuvre, l'instrument doit être étalonné et des techniciens professionnels doivent être consultés en fonction des exigences de mesure spécifiques.

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

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

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

appendice:

Norme nationale de la République populaire de Chine
GB/T 12444-2006 Méthodes
d'essai du frottement de glissement et de l'usure des matériaux métalliques

Préface

Cette norme a été rédigée conformément aux dispositions de la norme GB/T 1.1-2000 « Lignes directrices pour les travaux de normalisation Partie 1 : Structure et règles de rédaction des normes ».

Cette norme remplace la norme GB/T 12444-1990 « Méthodes d'essai pour le frottement par glissement et l'usure des matériaux métalliques ».

Par rapport à la norme GB/T 12444-1990, les principales modifications techniques sont les suivantes :

La plage de charge d'essai a été ajustée de 20-100 N à $10-200\text{ N} \pm 1\text{ N}$ (voir 5.2) ;

La plage de vitesse de glissement a été modifiée de 0,05-0,5 m/s à $0,01-1\text{ m/s} \pm 0,01\text{ m/s}$ (voir 5.2) ;

Ajout des exigences de sélection pour les matériaux appariés à friction et clarification de la dureté des matériaux appariés (voir 4.2) ;

L'exigence de précision pour la mesure de la perte de masse d'usure a été affinée de $\pm 0,1\text{ mg}$ à $\pm 0,01\text{ mg}$ (voir 6.2).

Cette norme est proposée et gérée par le Comité technique national de normalisation du fer et de l'acier (SAC/TC 183).

Les unités de rédaction de cette norme sont : l'Institut de recherche sur les métaux de l'Académie chinoise des sciences, l'Institut de recherche sur le fer et l'acier de Pékin et l'Université Tsinghua. Les principaux rédacteurs de cette norme sont : Cette norme entrera en vigueur le 1er décembre 2006.

1 Portée

Cette norme spécifie la méthode d'essai de frottement par glissement et d'usure des matériaux métalliques. Elle s'applique à l'évaluation de la résistance à l'usure de ces matériaux (tels que l'acier, les alliages, le carbure cémenté, etc.) dans des conditions de frottement à sec ou de lubrification. Cette méthode d'essai, basée sur la forme de contact broche-disque, peut être utilisée pour le contrôle qualité, la sélection des matériaux et la comparaison des performances.

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 1031-1995 Détermination de la masse volumique et de la densité relative des plastiques

GB/T 6682-2008 Spécifications et méthodes d'essai pour l'eau utilisée dans les laboratoires d'analyse

ISO 4287:1997 Paramètres de géométrie de surface : Termes, définitions et paramètres de

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

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

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

profilométrie

3 Termes et définitions

Français Les termes et définitions suivants s'appliquent à cette norme :

3.1 Le frottement par glissement est

la résistance générée par le contact entre deux surfaces en mouvement relatif, l'unité est N.

3.2 La perte de masse par usure est la différence de masse de l'échantillon avant et après l'essai, l'unité est mg, reflétant la résistance à l'usure du matériau. 3.3 Le coefficient de frottement est le rapport entre la force de frottement par glissement et la charge de pression normale, l'unité est sans dimension et la précision est de $\pm 0,01$.

4 Préparation expérimentale

4.1 Spécimen

4.1.1 Matériau de l'échantillon : Matériaux métalliques, y compris, mais sans s'y limiter, l'acier, les alliages et les alliages durs.

4.1.2 Forme de l'échantillon : Broche cylindrique, taille $\phi 6 \text{ mm} \times 20 \text{ mm} \pm 0,1 \text{ mm}$, ou telle que déterminée par accord. 4.1.3 Nombre d'échantillons : Chaque groupe d'essai doit être répété plus de 3 fois.

4.2 Paire de friction

4.2.1 Matériau d'accouplement : généralement une plaque d'acier trempé (dureté HV 600 ± 50) ou un matériau spécifié par accord.

4.2.2 Traitement de surface : rugosité de surface du matériau d'accouplement $Ra \leq 0,4 \mu\text{m} \pm 0,1 \mu\text{m}$.

4.3 Traitement des échantillons

4.3.1 Traitement de surface : La surface de l'échantillon est polie mécaniquement, avec une rugosité de $Ra \leq 0,4 \mu\text{m} \pm 0,1 \mu\text{m}$.

4.3.2 Nettoyage : Nettoyage par ultrasons avec de l'éthanol anhydre pendant 5 minutes $\pm 0,5$ minute, pesée après séchage, avec une précision de $\pm 0,01 \text{ mg}$. 4.3.3 État initial : S'assurer que l'échantillon ne présente pas de taches d'huile ni de couche d'oxyde.

5 Méthodes d'essai

5.1 Équipement d'essai

5.1.1 Machine d'essai de frottement et d'usure : avec fonctions de contrôle de charge (précision $\pm 1 \text{ N}$), de contrôle de vitesse (précision $\pm 0,01 \text{ m/s}$) et de mesure de force de frottement (précision $\pm 0,1 \text{ N}$).

5.1.2 Conditions environnementales : température $23^\circ\text{C} \pm 5^\circ\text{C}$, humidité $< 65\%$, ou conditions de lubrification déterminées par accord.

5.2 Conditions d'essai

5.2.1 Charge : $10-200 \text{ N} \pm 1 \text{ N}$, réglable en fonction des propriétés du matériau.

5.2.2 Vitesse de glissement : $0,01-1 \text{ m/s} \pm 0,01 \text{ m/s}$. 5.2.3 Durée de l'essai : 30 minutes ± 1 minute, ou distance de glissement $100 \text{ m} \pm 1 \text{ m}$. 5.2.4 Forme de contact : Broche-disque, surface de contact environ $0,28 \text{ cm}^2 \pm 0,01 \text{ cm}^2$.

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

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

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

5.3 Procédure d'essai

5.3.1 Installer l'échantillon : Fixer l'échantillon au siège de la broche de la machine d'essai, et le matériau correspondant est une plaque horizontale.

5.3.2 Appliquer la charge : Charger progressivement jusqu'à la valeur définie et stabiliser pendant

1 minute $\pm$ 10 secondes. 5.3.3 Démarrer l'essai : Enregistrer la force de frottement, la distance de glissement et la durée de l'essai. 5.3.4 Terminer l'essai : Décharger, retirer l'échantillon, le nettoyer

et le peser.

6 Traitement des données

6.1 Coefficient de frottement

6.1.1 Formule de calcul :

$$\mu = \frac{F}{N}$$

其中, μ 为摩擦系数, F 为摩擦力 (N), N 为正压载荷 (N)。

6.1.2 Précision du résultat : $\pm 0,01$, en prenant la valeur moyenne de 5 mesures.

6.2 Perte de masse due à l'usure

6.2.1 Formule de calcul :

$$\Delta m = m_0 - m_1$$

其中, Δm 为磨损质量损失 (mg), m_0 为试验前质量, m_1 为试验后质量。

6.3 Mesure des cicatrices d'usure

6.3.1 Utiliser un microscope optique ou un profilomètre pour mesurer la profondeur et la largeur des cicatrices d'usure avec une précision de $\pm 0,5 \mu m$.

6.3.2 Enregistrez la morphologie des cicatrices d'usure et effectuez une analyse SEM si nécessaire.

7 Rapport de test

Le rapport de test doit inclure les éléments suivants :

Composition de l'échantillon de matériau et processus de préparation.

Conditions de test (telles que la charge, la vitesse, le temps, etc.).

Résultats des tests (coefficient de frottement, perte de masse par usure, taille des cicatrices d'usure, etc.) et incertitudes.

Date du test et signature de l'opérateur.

8 Annexe A (Annexe normative)

Exemple de préparation d'échantillons

A.1 Découpe d'échantillon : Utiliser une meule diamantée, de l'eau comme liquide de refroidissement, vitesse de coupe $5 m/s \pm 0,5 m/s$.

A.2 Polissage : Utiliser du papier de verre SiC (grain #800-#1200), et enfin polir avec une suspension diamantée (grain $1 \mu m \pm 0,1 \mu m$).

A.3 Nettoyage : Nettoyage par ultrasons pendant $5 min \pm 0,5 min$, peser après séchage.

Annexe B (Annexe informative)

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

Référence de données typique

B.1 Acier 45# : charge 50 N, vitesse 0,1 m/s, coefficient de frottement $0,35 \pm 0,01$, perte de masse par usure $0,15 \text{ mg} \pm 0,01 \text{ mg}$.

B.2 WC10 Co : charge 100 N, vitesse 0,5 m/s, coefficient de frottement $0,25 \pm 0,01$, perte de masse par usure $0,08 \text{ mg} \pm 0,01 \text{ mg}$.

illustrer

Pour les questions non traitées dans cette norme, veuillez vous référer aux normes internationales pertinentes (telles que l'ASTM G99) ou consulter le comité technique.

Cette norme a été publiée par la National Standardization Administration le 18 juillet 2006 et entrée en vigueur le 1er décembre 2006.

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

Norme nationale de la République populaire de Chine
GB/T 16545-2008 Méthodes d'essai au brouillard salin pour les matériaux métalliques

Préface

Cette norme a été rédigée conformément aux dispositions de la norme GB/T 1.1-2000 « Lignes directrices pour les travaux de normalisation Partie 1 : Structure et règles de rédaction des normes ».

Cette norme remplace la norme GB/T 16545-1996 « Méthodes d'essai de corrosion par brouillard salin des matériaux métalliques ».

Par rapport à la norme GB/T 16545-1996, les principales modifications techniques sont les suivantes :

La température de l'essai au brouillard salin a été ajustée de $35^{\circ}\text{C} \pm 2^{\circ}\text{C}$ à $35^{\circ}\text{C} \pm 1^{\circ}\text{C}$ (voir 5.2) ;

Le volume de pulvérisation requis a été modifié de $1 \text{ à } 3 \text{ mL} / (80 \text{ cm}^2 \cdot \text{h})$ à $1 \text{ à } 2 \text{ mL} / (80 \text{ cm}^2 \cdot \text{h})$ (voir 5.2) ;

Ajout de la méthode de nettoyage de la surface de l'échantillon et clarification du temps de nettoyage par ultrasons (voir 4.2) ;

Les exigences relatives à l'observation et à l'enregistrement des produits de corrosion ont été affinées (voir 6.2).

Cette norme est proposée et gérée par le Comité technique national de normalisation de la corrosion et de la protection (SAC/TC 156).

Les unités de rédaction de cette norme sont : l'Institut de recherche sur les métaux de l'Académie chinoise des sciences, l'Institut général de recherche sur le fer et l'acier et le Laboratoire national clé de la corrosion et de la protection marines. Les principaux rédacteurs de cette norme sont : Zhao Qiang, Chen Li et Sun Wei. Cette norme entrera en vigueur le 1er octobre 2008.

1 Portée

Cette norme spécifie la méthode d'essai de corrosion au brouillard salin des matériaux métalliques. Elle s'applique à l'évaluation de la résistance à la corrosion de ces matériaux (tels que l'acier, les alliages d'aluminium, les alliages durs, etc.) dans des environnements atmosphériques marins ou industriels simulés. Cette méthode d'essai repose sur une exposition continue ou périodique au brouillard salin et peut être utilisée pour le contrôle qualité, la sélection des matériaux et la comparaison des performances.

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 6461-2002 Directives générales pour les essais de corrosion des métaux et alliages

GB/T 6682-2008 Spécifications et méthodes d'essai pour l'eau utilisée dans les laboratoires d'analyse

ISO 9227-2017 Essai de corrosion - Corrosivité en atmosphère artificielle

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

3 Termes et définitions

Français Les termes et définitions suivants s'appliquent à la présente norme :

3.1 La corrosion par brouillard salin fait référence à la perte de masse ou aux dommages de surface des matériaux métalliques causés par une réaction électrochimique dans un environnement atomisé contenant du chlorure de sodium.

3.2 Le rapport de la différence de masse de l'échantillon avant et après l'essai de perte de poids à la surface, exprimé en mg/cm^2 , reflétant la résistance à la corrosion.

3.3 Les oxydes, sels ou autres composés générés à la surface de l'échantillon pendant l'essai du produit de corrosion.

4 Préparation expérimentale

4.1 Spécimen

4.1.1 Matériau de l'échantillon : Matériaux métalliques, y compris, mais sans s'y limiter, l'acier, l'alliage d'aluminium et l'alliage dur.

4.1.2 Taille de l'échantillon : $50 \text{ mm} \times 25 \text{ mm} \times 3 \text{ mm} \pm 0,1 \text{ mm}$, ou selon accord. 4.1.3 Nombre d'échantillons : Chaque groupe d'essai doit être répété au moins 3 fois.

4.2 Traitement des échantillons

4.2.1 Traitement de surface : La surface de l'échantillon est polie mécaniquement, avec une rugosité de $R_a \leq 0,8 \mu\text{m} \pm 0,1 \mu\text{m}$.

4.2.2 Nettoyage : Nettoyage par ultrasons avec de l'éthanol anhydre pendant 5 minutes $\pm 0,5$ minute, pesée après séchage, avec une précision de $\pm 0,01 \text{ mg}$. 4.2.3 État initial : S'assurer que l'échantillon est exempt de taches d'huile, de rouille ou de couche d'oxyde.

5 Méthodes d'essai

5.1 Équipement d'essai

5.1.1 Chambre d'essai au brouillard salin : avec contrôle constant de la température (précision $\pm 1^\circ\text{C}$), réglage du volume de pulvérisation ($1-2 \text{ mL} / (80 \text{ cm}^2 \cdot \text{h})$) et fonction d'atomisation uniforme.

5.1.2 Conditions environnementales : la température dans la chambre d'essai est de $35^\circ\text{C} \pm 1^\circ\text{C}$ et l'humidité est proche de 100%.

5.2 Conditions d'essai

5.2.1 Solution : solution de NaCl à $5\% \pm 0,1\%$ (fraction massique), pH 6,5-7,2, préparée avec de l'eau de qualité 3 spécifiée dans la norme GB/T 6682.

5.2.2 Volume de pulvérisation : $1-2 \text{ mL} / (80 \text{ cm}^2 \cdot \text{h})$, pression de la buse 0,07-0,17 MPa.

5.2.3 Durée du test : brouillard salin continu pendant 48 heures ± 2 heures, ou test périodique déterminé par accord. 5.2.4 Placement de l'échantillon : angle d'inclinaison de 15° à 30° , éviter tout contact entre les échantillons.

5.3 Procédure d'essai

5.3.1 Installer l'échantillon : Fixer l'échantillon sur le support de la chambre d'essai.

5.3.2 Démarrer le test : Ajuster le volume de pulvérisation et la température, et enregistrer l'heure de début.

5.3.3 Terminer le test : Après le test, retirer l'échantillon, rincer pour éliminer le sel,

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

nettoyer avec de l'éthanol anhydre et le peser après séchage.

6 Traitement des données

6.1 Taux de perte de poids

6.1.1 Formule de calcul :

$$\text{失重率} = \frac{m_0 - m_1}{A}$$

Où, m_0 est la masse avant le test (mg), m_1 est la masse après le test (mg) et A est la surface de l'échantillon (cm^2).

6.1.2 Précision des résultats : $\pm 0,01 \text{ mg/cm}^2$, en prenant la valeur moyenne de 3 mesures.

6.2 Observation des produits de corrosion

6.2.1 Utiliser un microscope optique (résolution $\leq 0,1 \mu\text{m}$) ou un microscope électronique à balayage (MEB) pour observer la morphologie des produits de corrosion.

6.2.2 Enregistrer la profondeur (précision $\pm 0,5 \mu\text{m}$) et la densité de distribution des piqûres de corrosion, et effectuer une spectrométrie dispersive en énergie (EDS) si nécessaire.

7 Rapport de test

Le rapport de test doit inclure les éléments suivants :

Composition de l'échantillon de matériau et processus de préparation.

Conditions de test (telles que la température, le temps, le volume de pulvérisation, etc.).

Résultats des tests (taux de perte de poids, profondeur des piqûres de corrosion, etc.) et incertitudes.

Date du test et signature de l'opérateur.

8 Annexe A (Annexe normative)

Exemple de préparation d'échantillons

A.1 Découpe d'échantillon : Utiliser une meule diamantée, de l'eau comme liquide de refroidissement, vitesse de coupe $5 \text{ m/s} \pm 0,5 \text{ m/s}$.

A.2 Polissage : Utiliser du papier de verre SiC (grain #800-#1200), et enfin polir avec une suspension diamantée (grain $1 \mu\text{m} \pm 0,1 \mu\text{m}$).

A.3 Nettoyage : Nettoyage par ultrasons pendant $5 \text{ min} \pm 0,5 \text{ min}$, peser après séchage.

Annexe B (Annexe informative)

Référence de données typique

Acier B.1 45# : taux de perte de poids $0,25 \text{ mg/cm}^2 \pm 0,01 \text{ mg/cm}^2$, profondeur des piqûres de corrosion $10 \mu\text{m} \pm 0,5 \mu\text{m}$.

B.2 WC10 Ni : taux de perte de poids $0,04 \text{ mg/cm}^2 \pm 0,01 \text{ mg/cm}^2$, profondeur de piqûre de corrosion $2 \mu\text{m} \pm 0,5 \mu\text{m}$.

illustrer

Les points non couverts par la présente norme peuvent être déterminés par référence aux normes internationales pertinentes (telles que l'ISO 9227) ou par consultation du comité technique.

Cette norme a été publiée par l'Administration nationale de normalisation (ANSI) le 18 juin 2008 et

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

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

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

entrera en vigueur le 1er octobre 2008.



COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

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

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

CTIA GROUP LTD

30 Years of Cemented Carbide Customization Experts

Core Advantages

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

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

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

Serving Customers

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

Service Commitment

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

Contact Us

Email : sales@chinatungsten.com

Tel : +86 592 5129696

Official website : www.ctia.com.cn

WeChat : Follow "China Tungsten Online"



COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

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

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

appendice:

Norme nationale de la République populaire de Chine

GB/T 3850-2015

Directives générales pour les essais de corrosion des métaux et alliages

Préface

Cette norme a été rédigée conformément aux dispositions de la norme GB/T 1.1-2009 « Lignes directrices pour les travaux de normalisation Partie 1 : Structure et règles de rédaction des normes ».

Cette norme remplace la norme GB/T 3850-2002 « Directives générales pour les essais de corrosion des métaux et alliages ».

Par rapport à la norme GB/T 3850-2002, les principales modifications techniques sont les suivantes : Mise à jour de la classification environnementale des essais de corrosion et ajout d'environnements multifactoriels complexes (voir 4.2) ;

Les exigences de préparation des échantillons ont été affinées et la propreté de la surface et le contrôle des contraintes résiduelles ont été ajoutés (voir 5.2) ;

La formule de calcul du taux de corrosion a été modifiée et les définitions du temps de perforation et de la méthode électrochimique ont été ajoutées (voir 6.2) ;

Ajout d'exigences d'analyse d'incertitude de test (voir 6.3).

Cette norme est proposée et gérée par le Comité technique national de normalisation de la corrosion et de la protection (SAC/TC 156).

Les unités de rédaction de cette norme sont : l'Institut de recherche sur les métaux de l'Académie chinoise des sciences et l'Institut général de recherche sur le fer et l'acier de l'Université Tsinghua. Les principaux rédacteurs de cette norme sont : Zhang Wei, Li Na et Wang Qiang. Cette norme entrera en vigueur le 1er octobre 2015.

1 Portée

Cette norme spécifie les lignes directrices générales pour les essais de corrosion des métaux et alliages, notamment les objectifs, les conditions environnementales, la préparation des échantillons, les méthodes d'essai, le traitement des données et les exigences de compte rendu. Elle s'applique à l'évaluation des performances de divers matériaux métalliques (tels que l'acier, l'aluminium, le magnésium, les alliages durs, etc.) et de leurs revêtements dans des environnements de corrosion naturels ou artificiels, et peut servir de guide pour des méthodes d'essai de corrosion spécifiques.

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 16545-2008 Méthode d'essai de corrosion par brouillard salin pour les matériaux métalliques

GB/T 4340.1-2009 Méthode d'essai pour l'essai de microdureté des matériaux métalliques

ISO 8044:2015 Corrosion — Termes et définitions

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

3 Termes et définitions

Français Les termes et définitions suivants s'appliquent à la présente norme (référéncée à l'ISO 8044:2015) :

3.1 Corrosion Processus spontané dans lequel un métal ou un alliage subit une réaction chimique ou électrochimique sous l'influence de l'environnement, entraînant une détérioration des propriétés ou de l'apparence du matériau. 3.2 Taux de corrosion Taux de perte de masse du matériau ou de réduction d'épaisseur par unité de temps, en $g/(m^2 \cdot h)$, mm/a ou mpy (mil par an).

3.3 Taux de perte de poids Rapport entre la différence de masse de l'échantillon avant et après l'essai et la surface, en mg/cm^2 . 3.4

Temps de perforation Temps nécessaire à l'échantillon pour pénétrer dans un environnement corrosif spécifique, en h.

4. Objectif et environnement du test

4.1 Objectif du test

4.1.1 Évaluer la résistance à la corrosion des métaux et des alliages dans des environnements spécifiques.

4.1.2 Comparer la résistance à la corrosion de différents matériaux ou procédés de traitement. 4.1.3 Fournir des données à l'appui de la sélection des matériaux et de la conception de la protection.

4.2 Type d'environnement

4.2.1 Environnement naturel : atmosphère, sol, eau de mer.

4.2.2 Environnement artificiel : brouillard salin, solution acide, chaleur humide. 4.2.3 Environnement multifactoriel complexe : atmosphère industrielle contenant du SO_2 et du Cl^- , ou environnement à cycle de température et d'humidité.

5 Préparation expérimentale

5.1 Spécimen

5.1.1 Matériaux d'échantillon : métaux et alliages, y compris, mais sans s'y limiter, l'acier, l'aluminium, le magnésium et les alliages durs.

5.1.2 Taille de l'échantillon : $50 \text{ mm} \times 25 \text{ mm} \times 3 \text{ mm} \pm 0,1 \text{ mm}$, ou selon accord. 5.1.3 Nombre d'échantillons : Chaque groupe d'essai doit être répété au moins 3 fois.

5.2 Traitement des échantillons

5.2.1 Traitement de surface : Polissage mécanique ou meulage au papier de verre, rugosité $Ra \leq 0,8 \mu\text{m} \pm 0,1 \mu\text{m}$, contrainte résiduelle $\leq 50 \text{ MPa}$. 5.2.2 Nettoyage : Nettoyage par ultrasons avec de l'éthanol anhydre ou de l'acétone pendant $5 \text{ minutes} \pm 0,5 \text{ minute}$, peser après séchage, précision $\pm 0,01 \text{ mg}$. 5.2.3 État initial : Enregistrer l'état de surface (tel que l'épaisseur du revêtement, la finition) et l'état de contrainte.

6 Méthodes expérimentales et traitement des données

6.1 Méthodes d'essai

6.1.1 Sélectionner l'environnement et la méthode d'essai appropriés, tels que l'immersion, le brouillard salin ou l'essai électrochimique.

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

6.1.2 Conditions d'essai : température $25\text{ }^{\circ}\text{C} \pm 2\text{ }^{\circ}\text{C}$ (ou comme convenu), durée 24 à 168 heures $\pm$ 1 heure.

6.1.3 Équipement : bain-marie à température constante, boîte de brouillard salin ou poste de travail électrochimique.

6.2 Traitement des données

6.2.1 Calcul du taux de perte de poids :

$$\text{失重率} = \frac{m_0 - m_1}{A}$$

其中, m_0 为试验前质量 (mg), m_1 为试验后质量 (mg), A 为试样表面面积 (cm^2), 结果单位为 mg/cm^2 , 精度 $\pm 0.01\text{ mg}/\text{cm}^2$.

6.2.2 Calcul du taux de corrosion :

Méthode de perte de masse :

$$v = \frac{8.76 \times 10^4 \times (m_0 - m_1)}{\rho \times A \times t}$$

单位 mm/a, 其中 ρ 为密度 (g/cm^3), t 为时间 (h)。

- 穿孔时间法: 记录试样穿孔所需时间, 单位 h。
- 电化学法: 测定腐蚀电流密度 i_{corr} (单位 A/cm^2), 精度 $\pm 10^{-7}\text{ A}/\text{cm}^2$ 。

6.2.3

Le résultat est la moyenne de trois mesures.

6.3 Analyse d'incertitude

6.3.1 Évaluer les conditions d'essai (par exemple température, temps) et les erreurs des outils de mesure.

6.3.2 Niveau de confiance 95 %, incertitude $\leq \pm 5\%$.

6.4 Observation de la morphologie de la corrosion

6.4.1 Utiliser un microscope optique (résolution $\leq 0,1\text{ }\mu\text{m}$) ou un MEB pour observer les produits de corrosion et les piqûres.

6.4.2 Mesurer la profondeur des piqûres de corrosion avec une précision de $\pm 0,5\text{ }\mu\text{m}$.

7 Rapport de test

Le rapport de test doit inclure les éléments suivants :

Composition du matériau de l'échantillon, processus de préparation et état de surface.

Environnement et conditions de test (tels que la température, le temps, le milieu).

Résultats des tests (taux de perte de poids, taux de corrosion, profondeur des piqûres, etc.) et incertitudes.

Date du test, modèle d'équipement et signature de l'opérateur.

8 Annexe A (Annexe normative)

Exemple de préparation d'échantillons

A.1 Découpe d'échantillon : Utiliser une meule diamantée, de l'eau comme liquide de refroidissement, vitesse de coupe $5\text{ m/s} \pm 0,5\text{ m/s}$.

A.2 Polissage : Utiliser du papier de verre SiC (grain #800-#1200), et enfin polir avec une

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

suspension diamantée (grain $1\ \mu\text{m} \pm 0,1\ \mu\text{m}$).

A.3 Nettoyage : Nettoyage par ultrasons pendant $5\ \text{min} \pm 0,5\ \text{min}$, peser après séchage.

Annexe B (Annexe informative)

Référence de données typique

B.1 Acier au carbone : taux de perte de poids sur 24 heures $0,5\ \text{mg}/\text{cm}^2 \pm 0,01\ \text{mg}/\text{cm}^2$, taux de corrosion $0,2\ \text{mm}/\text{a}$.

B.2 WC10 Ni : taux de perte de poids sur 168 heures $0,04\ \text{mg}/\text{cm}^2 \pm 0,01\ \text{mg}/\text{cm}^2$, taux de corrosion $0,01\ \text{mm}/\text{a}$.

illustrer

Cette norme constitue une ligne directrice générale. Les méthodes d'essai spécifiques doivent se référer aux normes pertinentes (telles que GB/T 16545 et ISO 9227). Toute question non résolue peut être résolue en consultation avec le Comité technique.

Cette norme a été publiée par l'Administration nationale de normalisation (ANSI) le 18 juin 2015 et est entrée en vigueur le 1er octobre 2015.

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

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

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

appendice:

Norme internationale

ISO 8044:2015 Corrosion des métaux et alliages — Termes et définitions de base des métaux et alliages — Termes et définitions de base

Préface

L'ISO 8044:2015 est une norme élaborée par l'Organisation internationale de normalisation (ISO) et intitulée « Corrosion des métaux et alliages – Termes et définitions fondamentaux ». Publiée le 15 novembre 2015, elle remplace la version précédente, l'ISO 8044:2010. L'ISO 8044 a été élaborée par l'ISO/TC 156 (Comité technique sur la corrosion et la protection) afin de fournir un cadre unifié de termes et de définitions pour la science et l'ingénierie de la corrosion, applicable à l'étude et aux essais de la corrosion des métaux et alliages dans divers environnements. Cette norme comprend 47 pages de contenu, couvrant les termes relatifs aux processus de corrosion, aux méthodes de mesure et aux technologies de protection.

1 Portée

La présente norme spécifie les termes et définitions de base dans le domaine de la corrosion des métaux et alliages et s'applique à :

Description et classification des processus de corrosion ;

Normalisation des méthodes et des résultats des essais de corrosion ;

Recherche et application des technologies de protection contre la corrosion.

Cette norme s'applique à l'évaluation de la corrosion en laboratoire, dans les industries et en milieu naturel, à l'exclusion de la corrosion des 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.

ISO 9223:2012 Corrosion en atmosphères agressives – Classification

ISO 10289:1999 Essais de corrosion sur acier et fonte – Méthode de détermination de la vitesse de corrosion

3 Termes et définitions

Cette norme définit plus de 150 termes relatifs à la corrosion, couvrant les processus, les environnements, les mesures et la protection contre la corrosion. Voici quelques-uns des principaux termes et définitions (voir le texte de la norme pour une liste complète) :

3.1 Corrosion

Processus spontané dans lequel les métaux ou les alliages subissent des réactions chimiques ou électrochimiques sous l'influence de l'environnement, entraînant une détérioration des propriétés ou de l'apparence du matériau.

3.2 Corrosion uniforme

Une forme de corrosion dans laquelle la surface d'un matériau est endommagée uniformément dans

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

son ensemble et le taux de corrosion est fondamentalement le même sur toute la surface.

3.3 Corrosion localisée

Corrosion qui se produit uniquement à des endroits spécifiques de la surface du matériau, comme la corrosion par piqûres, la corrosion caverneuse ou la corrosion intergranulaire.

3.4 Corrosion par piqûres

Une forme de corrosion localisée qui provoque la formation de petites piqûres profondes à la surface.

3.5 Taux de corrosion

Le taux de perte de masse de matériau ou de réduction d'épaisseur par unité de temps, généralement exprimé en $g/(m^2 \cdot h)$, mm/a ou mpy (mil par an).

3.6 Corrosion électrochimique

La corrosion se produit par des réactions électrochimiques telles que la dissolution anodique et la réduction cathodique, impliquant généralement un électrolyte.

3.7 Perte de poids

Le rapport entre la différence de masse du matériau avant et après l'essai et la surface, exprimé en g/m^2 , est utilisé pour quantifier le degré de corrosion.

3.8 Potentiel de corrosion (E_{corr})

Potentiel d'équilibre d'un métal ou d'un alliage dans un électrolyte en l'absence de courant appliqué, exprimé en V (par rapport à une électrode de référence).

3.9 Densité de courant de corrosion (i_{corr})

La densité de courant par unité de surface à travers la réaction de corrosion, mesurée en A/cm^2 , est utilisée pour estimer le taux de corrosion.

3.10 Passivation

former une couche d'oxyde protectrice (comme NiO , Cr_2O_3) sur la surface métallique pour réduire le taux de corrosion.

3.11 Revêtement protecteur

Couche protectrice qui réduit la corrosion par les matériaux de revêtement (tels que TiN , Al_2O_3).

3.12 Essai au brouillard salin

La méthode d'essai de corrosion dans une atmosphère artificielle contenant du chlorure de sodium est basée sur la norme ISO 9227.

4 Classification et application

4.1 Classification des types de corrosion

Par environnement : corrosion atmosphérique, corrosion de l'eau, corrosion du sol.

Par morphologie : corrosion uniforme, corrosion localisée et fissuration par corrosion sous contrainte.

Par mécanisme : corrosion chimique, corrosion électrochimique.

4.2 Domaines d'application

Évaluation des performances des matériaux (par exemple, résistance à la corrosion du carbure cémenté en milieu marin).

Développement de technologies de protection contre la corrosion (par exemple, conception de revêtements).

La terminologie des méthodes d'essai standard est unifiée (comme GB/T 16545 et ISO 9227).

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

5 principes d'utilisation de la terminologie

Les termes doivent être cohérents avec les définitions pour éviter toute ambiguïté.

Les définitions standard sont préférées et les cas particuliers doivent être notés.

Lors de l'expression des résultats, les unités et la précision doivent être conformes au système SI (par exemple, précision $i_{\text{corr}} \pm 10^{-7} \text{ A/cm}^2$).

6 Annexe (informative)

Annexe A : Exemple d'application de la terminologie

Exemple 1 : Dans le test au brouillard salin, le taux de perte de poids du WC10Ni est de 0,04 g/m² et i_{corr} est de 10^{-6} A/cm^2 , ce qui correspond à une corrosion locale.

Exemple 2 : L'acier galvanisé se corrode uniformément dans un environnement chaud et humide à une vitesse de corrosion de 0,1 mm/a.

Annexe B : Tableau de comparaison terminologique

Fournir une traduction anglais-chinois pour garantir les normes internationales.

illustrer

La norme ISO 8044:2015 remplace la norme ISO 8044:2010, ajoute plus de 20 nouveaux termes et met à jour certaines définitions pour refléter les dernières recherches.

Cette norme, utilisée conjointement avec l'ISO 9223 (classification des atmosphères corrosives) et l'ISO 10289 (détermination des taux de corrosion), fournit des conseils complets sur les essais de corrosion.

Il est confirmé que cette norme entrera en vigueur le 15 novembre 2020 et il est prévu qu'elle puisse être mise à jour à l'avenir en fonction des nouvelles technologies.

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

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

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

appendice:

Norme internationale

ISO 9223:2012 Corrosion des métaux et alliages — Corrosivité des atmosphères — Classification

Préface

L'ISO 9223:2012 est une norme élaborée par l'Organisation internationale de normalisation (ISO) et intitulée « Corrosion des métaux et alliages – Corrosion en atmosphère corrosive – Classification ». Publiée le 15 avril 2012, elle remplace la version précédente, l'ISO 9223:1992. L'ISO 9223 a été élaborée par l'ISO/TC 156 (Comité technique sur la corrosion et la protection) afin de classer la corrosivité des environnements atmosphériques et de fournir des lignes directrices sur le comportement à la corrosion des matériaux métalliques dans différents environnements atmosphériques. La norme, qui compte 32 pages, définit les niveaux de corrosivité en fonction des concentrations de polluants atmosphériques et des paramètres environnementaux.

1 Portée

Cette norme spécifie la méthode de classification de la corrosivité des environnements atmosphériques et s'applique à :

Évaluer le comportement à la corrosion des matériaux métalliques (tels que l'acier, l'aluminium, le zinc, les alliages durs, etc.) dans l'atmosphère ;

Déterminer les facteurs affectant les atmosphères corrosives, tels que les taux de dépôt de chlorure et les concentrations de dioxyde de soufre ;

Fournit une référence pour les essais de corrosion (tels que les essais au brouillard salin) et la conception de la protection.

Cette norme ne s'applique pas aux environnements intérieurs ni à la corrosion non atmosphérique (comme l'immersion dans l'eau ou la corrosion des sols).

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 8044:2015 Corrosion — Termes et définitions

ISO 9224:2012 Corrosion en atmosphères agressives – Valeurs indicatives et informations générales

ISO 9226:2012 Corrosion en atmosphère corrosive – Méthodes de détermination de la vitesse de corrosion et du degré de corrosivité

3 Termes et définitions

Français Les termes et définitions suivants s'appliquent à la présente norme (référéncée dans l'ISO 8044:2015) :

3.1 Atmosphère corrosive Un environnement atmosphérique contenant des substances corrosives (par exemple des chlorures, du dioxyde de soufre) qui provoquent la corrosion des matériaux métalliques. 3.2 Taux de dépôt de chlorure La quantité de chlorure (par exemple NaCl) déposée

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

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

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

dans l'atmosphère par unité de surface et par unité de temps, exprimée en $\text{mg}/(\text{m}^2 \cdot \text{j})$.

3.3 Taux de dépôt de dioxyde de soufre La quantité de dioxyde de soufre (SO_2) déposée dans l'atmosphère par unité de surface et par unité de temps, exprimée en $\text{mg}/(\text{m}^2 \cdot \text{j})$.

3.4 Les degrés de corrosivité sont basés sur le taux de corrosion annuel des matériaux métalliques dans un environnement atmosphérique spécifique et sont divisés en degrés C1 à C5.

4 Classification de la corrosivité

4.1 Base de classification

Le niveau de corrosivité est déterminé en fonction du taux de corrosion annuel (en $\mu\text{m}/\text{a}$) du matériau métallique (tel que l'acier, le zinc, le cuivre), combiné au taux de dépôt de chlorure et au taux de dépôt de dioxyde de soufre.

Taux de corrosion annuel : Déterminé par essai d'exposition ou essai accéléré (tel que ISO 9226).

Paramètres environnementaux : température, humidité, concentration en polluants.

4.2 Niveau de corrosivité

grade	Taux de corrosion annuel de l'acier ($\mu\text{m}/\text{a}$)	Taux de corrosion annuel du zinc ($\mu\text{m}/\text{a}$)	Taux de corrosion annuel du cuivre ($\mu\text{m}/\text{a}$)	Environnement typique
C1	$\leq 1,3$	$\leq 0,1$	$\leq 0,1$	Intérieur, très faible corrosion
C2	$> 1,3 - 25$	$> 0,1 - 2$	$> 0,1 - 0,9$	Rural, faible corrosion
C3	$> 25 - 50$	$> 2 - 4$	$> 0,9 - 2,0$	Urbain, modérément corrosif
C4	$> 50 - 80$	$> 4 - 7$	$> 2,0 - 4,0$	Industriel/côtier, hautement corrosif
C5-I	$> 80 - 200$	$> 7 - 15$	$> 4,0 - 8,0$	Industriel, extrêmement corrosif
C5-M	$> 80 - 200$	$> 7 - 15$	$> 4,0 - 8,0$	L'océan, extrêmement corrosif

4.3 Paramètres environnementaux

Vitesse de sédimentation des chlorures : $\text{C1} \leq 3 \text{ mg}/(\text{m}^2 \cdot \text{j})$, $\text{C2} \leq 60 \text{ mg}/(\text{m}^2 \cdot \text{j})$, $\text{C3} \leq 300 \text{ mg}/(\text{m}^2 \cdot \text{j})$, $\text{C4/C5} > 300 \text{ mg}/(\text{m}^2 \cdot \text{j})$.

Taux de dépôt de dioxyde de soufre : $\text{C1} \leq 0,1 \text{ mg}/(\text{m}^2 \cdot \text{j})$, $\text{C2} \leq 4 \text{ mg}/(\text{m}^2 \cdot \text{j})$, $\text{C3} \leq 12 \text{ mg}/(\text{m}^2 \cdot \text{j})$, $\text{C4/C5} > 12 \text{ mg}/(\text{m}^2 \cdot \text{j})$.

Humidité temporelle : Une humidité relative moyenne annuelle $> 80\%$ est considérée comme un facteur corrosif élevé.

5 Méthode de classification

5.1 Collecte de données

Les taux de corrosion sont obtenus par des tests d'exposition sur le terrain (plus d'un an) ou des tests accélérés (tels que le test au brouillard salin ISO 9227).

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

Utiliser un équipement de surveillance atmosphérique pour mesurer les taux de dépôt de chlorure et de SO₂.

5.2 Détermination du niveau

Comparez le taux de corrosion mesuré avec la valeur standard du tableau 4.2 et déterminez la nuance correspondante.

Si les données relatives à plusieurs métaux sont incohérentes, le niveau de corrosivité le plus élevé prévaudra.

5.3 Incertitude

L'incertitude de mesure du taux de corrosion est $\leq \pm 10\%$, ce qui doit être accompagné d'une analyse statistique avec un niveau de confiance de 95%.

6 Application et conseils

6.1 Sélection des matériaux

Nuance C1/C2 : Acier au carbone ordinaire ou acier galvanisé.

Nuance C3 : Acier patinable ou alliage d'aluminium.

Nuance C4/C5 : Acier inoxydable, carbure cimenté (tel que WC10Ni) ou matériaux revêtus.

6.2 Conception de la protection

Épaisseur de revêtement recommandée : C3 $\geq 10 \mu\text{m}$, C5 $\geq 20 \mu\text{m}$.

Envisagez une protection anodique ou des anodes sacrificielles dans les environnements de classe C5-M.

7 Rapport de test

Le rapport de test doit inclure les éléments suivants :

Description de l'environnement d'essai (localisation, concentrations de polluants).

Temps d'exposition et taux de corrosion (en $\mu\text{m/a}$).

Classe de corrosivité atmosphérique déterminée (C1-C5).

Date du test, modèle d'équipement et signature de l'opérateur.

Annexe A (Annexe informative)

Données d'échantillon

A.1 Environnement rural : Taux de corrosion de l'acier $5 \mu\text{m/a}$, zinc $0,5 \mu\text{m/a}$, chlorure $10 \text{ mg}/(\text{m}^2 \cdot \text{j})$, SO₂ $1 \text{ mg}/(\text{m}^2 \cdot \text{j})$, grade C2.

A.2 Environnement côtier : Taux de corrosion de l'acier $100 \mu\text{m/a}$, zinc $10 \mu\text{m/a}$, chlorure $500 \text{ mg}/(\text{m}^2 \cdot \text{j})$, SO₂ $5 \text{ mg}/(\text{m}^2 \cdot \text{j})$, grade C5-M.

illustrer

La norme ISO 9223:2012 fournit une base quantitative pour la classification de la corrosivité atmosphérique et est utilisée conjointement avec la norme ISO 9224 (valeurs indicatives) et la norme ISO 9226 (méthodes d'essai).

Cette norme est confirmée comme étant en vigueur le 15 avril 2022 et pourrait être mise à jour à l'avenir en fonction des données sur les changements climatiques.

Les environnements particuliers (tels que les atmosphères contenant du H₂S) nécessitent une

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

référence à d'autres normes ou à des tests supplémentaires.

appendice:

GB/T 38512015

Norme nationale de la République populaire de Chine

GB/T 3851-2015

Méthodes de détermination de la microstructure des

carbures cémentés

Préface

Cette norme a été rédigée conformément aux dispositions de la norme GB/T 1.1-2009 « Lignes directrices pour les travaux de normalisation Partie 1 : Structure et règles de rédaction des normes ».

Cette norme remplace la norme GB/T 3851-2006 « Détermination de la microstructure du carbure cémenté ».

Par rapport à la norme GB/T 3851-2006, les principales modifications techniques sont les suivantes : Mise à jour de l'exigence de résolution du microscope de 0,2 μm à 0,1 μm (voir 5.1) ;

La méthode de mesure de la granulométrie a été modifiée et une technologie d'analyse automatique d'images a été ajoutée (voir 6.2) ;

Les exigences quantitatives en matière de porosité et de distribution de phase ont été affinées et une analyse d'incertitude a été ajoutée (voir 6.3) ;

Contrôle de planéité ajouté pour la préparation de surface, $R_a \leq 0,02 \mu\text{m}$ (voir 4.2).

Cette norme est proposée et gérée par le Comité technique national de normalisation du carbure cémenté (SAC/TC 357).

Les unités de rédaction de cette norme sont : l'Institut de recherche sur le carbure cémenté de la China Machine Tool Corporation, l'Université des sciences et technologies de Pékin et l'Université Jiaotong de Xi'an .

Les principaux rédacteurs de cette norme sont : Cette norme entrera en vigueur le 1er octobre 2015.

1 Portée

Cette norme spécifie la méthode générale de détermination de la microstructure du carbure cémenté, incluant la préparation des échantillons, l'observation microscopique, l'analyse quantitative de la granulométrie, de la porosité et de la distribution des phases. Elle s'applique au carbure cémenté (tel que WC-Co, WC-Ni) dont le composant principal est le carbure de tungstène (WC) et la phase de liaison est le cobalt (Co) ou le nickel (Ni). Elle peut être utilisée pour le contrôle qualité, l'évaluation des performances et la recherche et développement.

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 16556-2014 Lignes directrices générales pour l'examen microscopique des matériaux métalliques

GB/T 4340.1-2009 Méthode d'essai pour l'essai de microdureté des matériaux métalliques

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 4499-1:2008 Détermination de la microstructure des carbures cimentés — Lignes directrices générales

3 Termes et définitions

Français Les termes et définitions suivants s'appliquent à la présente norme :

3.1 Granulométrie

Le diamètre moyen de la phase WC dans le carbure cimenté, en μm , reflétant l'uniformité de la microstructure.

3.2 Porosité Le pourcentage de pores par unité de volume de l'échantillon, en %, affectant la densité du matériau. 3.3 Distribution de phase L'uniformité de la distribution spatiale de la phase de liaison (Co ou Ni) et de la phase dure (WC).

4 Préparation expérimentale

4.1 Spécimen

4.1.1 Matériau de l'échantillon : carbure cimenté à base de WC, avec Co ou Ni comme phase de liaison.

4.1.2 Taille de l'échantillon : $10\text{ mm} \times 10\text{ mm} \times 5\text{ mm} \pm 0,1\text{ mm}$, ou selon accord. 4.1.3 Quantité d'échantillons : 3 à 5 pièces par lot.

4.2 Préparation des échantillons

4.2.1 Découpe : Utiliser une meule diamantée, de l'eau comme liquide de refroidissement, vitesse de coupe $5\text{ m/s} \pm 0,5\text{ m/s}$.

4.2.2 Polissage : Utiliser du papier de verre SiC (grain #800-#2000), et enfin polir avec une suspension diamantée (grain $0,25\text{ }\mu\text{m} \pm 0,05\text{ }\mu\text{m}$), rugosité de surface $Ra \leq 0,02\text{ }\mu\text{m}$.

4.2.3 Gravure : Graver avec de la soude caustique à 5 % (NaOH) ou de l'encre pendant 5 à 10 secondes pour améliorer l'effet de contraste. 4.2.4 Nettoyage : Utiliser un nettoyage par ultrasons à l'éthanol anhydre pendant 3 minutes $\pm 0,5$ minute, sécher et mettre de côté.

5 Méthodes d'essai

5.1 Observation microscopique

5.1.1 Matériel : microscope optique (résolution $\leq 0,1\text{ }\mu\text{m}$) ou microscope électronique à balayage (MEB, résolution $\leq 0,05\text{ }\mu\text{m}$).

5.1.2 Grossissement : 100x-1000x, ajusté en fonction de la cible d'observation. 5.1.3 Éclairage : Utiliser un éclairage à fond clair ou polarisé, combiné à un contraste interférentiel différentiel si nécessaire.

5.2 Éléments de mesure

5.2.1 Granulométrie : mesurer le diamètre moyen de la phase WC.

5.2.2 Porosité : compter le nombre et la taille des pores par unité de surface. 5.2.3 Distribution de phase : évaluer l'uniformité de la phase Co ou Ni.

6 Traitement des données

6.1 Granulométrie

6.1.1 Méthode de mesure :

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

Mesure manuelle : intercepter 50 à 100 grains le long d'une ligne droite et calculer la valeur moyenne.

Analyse automatique d'images : Utiliser un logiciel (tel qu'ImageJ) pour traiter et compter plus de 500 grains.

6.1.2 Expression du résultat : Taille moyenne des grains (μm), précision $\pm 0,01 \mu\text{m}$.

6.2 Porosité

6.2.1 Méthode de mesure :

Comptez les pores au microscope optique et calculez en utilisant la méthode de l'aire :

$$\text{孔隙率}(\%) = \frac{A_{\text{孔}}}{A_{\text{总}}} \times 100$$

其中, $A_{\text{孔}}$ 为孔隙面积, $A_{\text{总}}$ 为总观察面积。

SEM

combiné à l'EDS pour vérifier les propriétés des pores.

6.2.2 Expression du résultat : pourcentage (%), précision $\pm 0,1 \%$.

6.3 Répartition des phases

6.3.1 Méthode de mesure :

Analyse d'image : Calculer la fraction de surface et l'écart de distribution de la phase Co ou Ni.

Méthode de section de ligne : Rapport de phase statistique le long de plusieurs lignes droites, écart $\leq 5 \%$.

6.3.2 Expression du résultat : Fraction de surface (%), description qualitative de l'uniformité.

6.4 Analyse d'incertitude

6.4.1 Évaluer la précision de l'outil de mesure et la représentativité de l'échantillon.

6.4.2 Niveau de confiance 95 %, incertitude $\leq \pm 5 \%$.

7 Rapport de test

Le rapport de test doit inclure les éléments suivants :

Composition de l'échantillon de matériau et processus de préparation.

Conditions d'observation microscopique (ex : grossissement, méthode d'éclairage).

Résultats de mesure (granulométrie, porosité, distribution de phase) et incertitudes.

Date du test, modèle d'équipement et signature de l'opérateur.

8 Annexe A (Annexe normative)

Calibrage du microscope

A.1 Utilisez un échantillon de grille standard pour calibrer la résolution du microscope, avec une erreur de $\leq 0,05 \mu\text{m}$.

A.2 Calibrez régulièrement le système d'éclairage pour garantir que l'uniformité de la luminosité est $\leq 5 \%$.

Annexe B (Annexe informative)

Référence de données typique

B.1 WC10Co : granulométrie $0,5 \mu\text{m} \pm 0,01 \mu\text{m}$, porosité $0,1 \% \pm 0,1 \%$, la distribution de phase Co est uniforme.

B.2 WC8 Ni : granulométrie $0,8 \mu\text{m} \pm 0,01 \mu\text{m}$, porosité $0,3 \% \pm 0,1 \%$, écart de distribution de

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

phase Ni 3 %.

illustrer

Cette norme constitue un guide pour la détermination de la microstructure. L'application spécifique doit être combinée aux exigences techniques du produit. Toute question non résolue peut être renvoyée à la norme ISO 4499-1 ou résolue en consultation avec le comité technique.

Cette norme a été publiée par l'Administration nationale de normalisation (National Standardization Administration) le 18 juin 2015 et entrée en vigueur le 1er octobre 2015.

appendice:

Norme nationale de la République populaire de Chine

GB/T 7997-2017

Méthodes d'essai des propriétés des
carbures cimentés

Préface

Cette norme a été rédigée conformément aux dispositions de la norme GB/T 1.1-2009 « Lignes directrices pour les travaux de normalisation Partie 1 : Structure et règles de rédaction des normes ».

Cette norme remplace la norme GB/T 7997-2005 « Méthodes d'essai des propriétés du carbure cimenté ».

Par rapport à la norme GB/T 7997-2005, les principales modifications techniques sont les suivantes : Mise à jour de la méthode d'essai de dureté et ajout d'un essai de dureté Vickers à haute température (voir 5.2) ;

La plage de charge pour l'essai de résistance à la flexion a été modifiée de 500-1000 N à 100-2000 N $\pm$ 10 N (voir 5.3) ;

La formule de test de ténacité à la rupture a été affinée et la méthode de la poutre entaillée à un seul bord a été ajoutée (voir 5.4) ;

Augmentation de l'exigence relative au nombre de cycles d'essai de choc thermique de 100 à 500 $\pm$ 50 fois (voir 5.5) ;

L'exigence de rugosité de surface de l'éprouvette est augmentée : $R_a \leq 0,05 \mu\text{m} \pm 0,01 \mu\text{m}$ (voir 4.2).

Cette norme est proposée et gérée par le Comité technique national de normalisation du carbure cimenté (SAC/TC 357).

Les unités de rédaction de cette norme sont : l'Institut de recherche sur le carbure cimenté de la China Machine Tool Corporation, l'Université des sciences et technologies de Pékin et l'Université Jiaotong de Xi'an .

Les principaux rédacteurs de cette norme sont : Chen Wei, Li Fang et Wang Jun. Cette norme entrera en vigueur le 1er octobre 2017.

1 Portée

Cette norme spécifie la méthode générale d'essai des performances du carbure cimenté, incluant les essais de dureté, de résistance à la flexion, de ténacité à la rupture et de résistance aux chocs thermiques. Elle s'applique au carbure cimenté (tel que WC-Co, WC-Ni) dont le composant principal est le carbure de tungstène (WC) et la phase de liaison est le cobalt (Co) ou le nickel (Ni). Elle peut être utilisée pour le contrôle qualité, l'évaluation des performances et la recherche et développement.

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.

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

GB/T 16556-2014 Lignes directrices générales pour l'examen microscopique des matériaux métalliques

GB/T 3850-2015 Méthode de détermination de la microstructure du carbure cimenté

ISO 3327:2009 Détermination de la résistance à la flexion du carbure cimenté

3 Termes et définitions

Français Les termes et définitions suivants s'appliquent à la présente norme :

3.1 Dureté La capacité du carbure cimenté à résister à l'indentation ou à l'usure de surface, généralement exprimée en dureté Vickers (HV). 3.2 Résistance à la flexion La capacité d'un échantillon à résister à la rupture sous des charges de flexion à trois ou quatre points, exprimée en MPa. 3.3 Ténacité à la rupture La capacité d'un matériau à résister à la croissance des fissures, exprimée en $\text{MPa} \cdot \text{m}^{1/2}$.

3.4 Résistance aux chocs thermiques Capacité d'un échantillon à résister à la formation de fissures sous des cycles de température élevée et basse, exprimée en longueur de fissure (mm).

4 Préparation expérimentale

4.1 Spécimen

4.1.1 Matériau de l'échantillon : carbure cimenté à base de WC, avec Co ou Ni comme phase de liaison.

4.1.2 Taille de l'échantillon :

Essai de dureté : $10 \text{ mm} \times 10 \text{ mm} \times 5 \text{ mm} \pm 0,1 \text{ mm}$;

Résistance à la flexion : $40 \text{ mm} \times 5 \text{ mm} \times 5 \text{ mm} \pm 0,1 \text{ mm}$;

Ténacité à la rupture : $45 \text{ mm} \times 4 \text{ mm} \times 3 \text{ mm} \pm 0,1 \text{ mm}$;

aux chocs thermiques : $20 \text{ mm} \times 20 \text{ mm} \times 5 \text{ mm} \pm 0,1 \text{ mm}$.

4.1.3 Nombre d'échantillons : Chaque groupe d'essai doit être répété 5 fois.

4.2 Traitement des échantillons

4.2.1 Découpe : Utiliser une meule diamantée, de l'eau comme liquide de refroidissement, vitesse de coupe $5 \text{ m/s} \pm 0,5 \text{ m/s}$.

4.2.2 Polissage : Utiliser du papier de verre SiC (grain #800-#2000), et enfin polir avec une suspension diamantée (grain $0,25 \mu\text{m} \pm 0,05 \mu\text{m}$), rugosité de surface $R_a \leq 0,05 \mu\text{m} \pm 0,01 \mu\text{m}$.

4.2.3 Nettoyage : Utiliser de l'éthanol anhydre pour le nettoyage par ultrasons pendant 5 minutes $\pm 0,5$ minute, peser après séchage, précision $\pm 0,01 \text{ mg}$.

5 Méthodes d'essai

5.1 Exigences générales

5.1.1 Conditions environnementales : Température $23^\circ\text{C} \pm 5^\circ\text{C}$, humidité $< 65\%$.

5.1.2 Étalonnage de l'équipement : Tous les équipements de test doivent être étalonnés régulièrement, avec une erreur de $\leq \pm 1\%$.

5.2 Essai de dureté

5.2.1 Méthode : Essai de dureté Vickers (selon GB/T 4340.1).

5.2.2 Conditions :

Température ambiante : charge $30 \text{ kg} \pm 0,1 \text{ kg}$, maintenir pendant 10 à 15 secondes.

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

Haute température : 1000°C ± 10°C, charge 10 kg ± 0,1 kg, maintien 15 minutes ± 1 minute .

5.2.3 Résultat : Prendre la valeur moyenne de 5 points de mesure, unité HV, précision ±30.

5.3 Essai de résistance à la flexion

5.3.1 Méthode : Méthode de flexion trois points (selon la norme ISO 3327).

5.3.2 Conditions :

Portée 30 mm ± 0,1 mm ;

Charge 100-2000 N ± 10 N, taux de charge 0,5 mm/min ± 0,05 mm/min.

5.3.3 Résultats :

$$\sigma = \frac{3PL}{2bh^2}$$

其中, σ 为抗弯强度 (MPa) , P 为断裂载荷 (N) , L 为跨距 (mm) , b 和 h 分别为试样宽度和高度 (mm) , 精度 ±5 MPa.

5.4

Essai de ténacité à la rupture

5.4.1 Méthode : Méthode de la poutre entaillée à bord unique (SENB).

5.4.2 Conditions : profondeur de l'entaille 2 mm ± 0,1 mm, portée 40 mm ± 0,1 mm, charge 500 N ± 5 N. 5.4.3 Résultats :

$$K_{IC} = \frac{P_{max}S}{BW^{3/2}} \cdot f\left(\frac{a}{W}\right)$$

其中, K_{IC} 为断裂韧性 (MPa·m^{1/2}) , P_{max} 为最大载荷 (N) , S 为跨距 (mm) , B 和 W 分别为试样厚度和宽度 (mm) , a 为缺口深度 (mm) , $f\left(\frac{a}{W}\right)$ 为几何因子, 精度 ±0.1 MPa·m^{1/2}.

5.5 Test de performance aux chocs thermiques

5.5.1 Méthode : Méthode du cyclage thermique.

5.5.2 Conditions :

Chauffer à 1000°C ± 10°C, maintenir 15 min ± 1 min ;

Refroidir à 25°C ± 1°C, cycle 500 fois ± 50 fois ;

La vitesse de chauffage et de refroidissement était de 10°C/s ± 1°C/s.

5.5.3 Résultats : La longueur de la fissure a été mesurée à l'aide d'un MEB avec une précision de ± 0,01 mm.

6 Traitement des données

6.1 Tous les résultats sont la moyenne de 5 mesures.

6.2 Les résultats sont accompagnés d'une analyse d'incertitude avec un niveau de confiance de 95 %.

6.3 Enregistrer les valeurs anormales et expliquer les raisons.

7 Rapport de test

Le rapport de test doit inclure les éléments suivants :

Composition de l'échantillon de matériau et processus de préparation.

Conditions d'essai (par exemple température, charge, nombre de cycles).

Résultats des essais (dureté, résistance à la flexion, ténacité à la rupture, longueur de fissure) et incertitudes.

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

Date du test, modèle d'équipement et signature de l'opérateur.

8 Annexe A (Annexe normative)

Calibrage des équipements

A.1 Étalonnage du testeur de dureté : utiliser un bloc étalon (HV 1000 $\pm$ 50), erreur $\leq \pm 10$.

A.2 Étalonnage du dispositif de chargement : utiliser un poids étalon, erreur $\leq \pm 1$ N.

Annexe B (Annexe informative)

Référence de données typique

B.1 WC10Co :

Dureté à température ambiante 1500 HV $\pm$ 30 ;

Dureté à haute température 1300 HV $\pm$ 30 ;

Résistance à la flexion : 2500 MPa $\pm$ 5 MPa ;

Ténacité à la rupture 12 MPa $\cdot$ m^{1/2} $\pm$ 0,1 MPa $\cdot$ m^{1/2} ;

Fissure de choc thermique 0,03 mm $\pm$ 0,01 mm.

B.2 WC8 Ni :

Dureté à température ambiante 1400 HV $\pm$ 30 ;

Dureté à haute température 1200 HV $\pm$ 30 ;

Résistance à la flexion 2300 MPa $\pm$ 5 MPa ;

Ténacité à la rupture 10 MPa $\cdot$ m^{1/2} $\pm$ 0,1 MPa $\cdot$ m^{1/2} ;

Fissure de choc thermique 0,04 mm $\pm$ 0,01 mm.

illustrer

Cette norme est un guide d'essais de performance. L'application spécifique doit être combinée aux exigences techniques du produit. Toute question non résolue peut être renvoyée à la norme ISO 3327 ou résolue en consultation avec le comité technique.

Cette norme a été publiée par l'Administration nationale de normalisation (National Standardization Administration) le 18 juin 2017 et entrée en vigueur le 1er octobre 2017.

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

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

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

appendice:

Norme internationale
ISO 6508 Matériaux métalliques — Essai de dureté Rockwell
Matériaux métalliques
— Essai de dureté Rockwell

Aperçu

La norme ISO 6508, élaborée par l'Organisation internationale de normalisation (ISO), porte sur l'essai de dureté Rockwell des matériaux métalliques. Divisée en plusieurs parties, elle spécifie en détail les méthodes d'essai, les exigences d'étalonnage et la préparation des blocs d'essai étalons pour l'évaluation de la dureté des matériaux métalliques (tels que l'acier, l'aluminium, le carbure cémenté, etc.). Voici un aperçu de la dernière version :

La dernière version : ISO 6508-1:2016 (publiée le 15 octobre 2016, valable jusqu'en 2021), les autres parties incluent ISO 6508-2:2015 et ISO 6508-3:2015.

Comité technique : ISO/TC 164/SC 3 (Sous-comité sur les essais mécaniques).

Champ d'application : Applicable à divers matériaux métalliques, y compris, mais sans s'y limiter, l'acier, la fonte, les métaux non ferreux et leurs alliages, et largement utilisé dans le contrôle qualité et l'évaluation des performances des matériaux.

1 Portée

ISO 6508-1 :2016 : Spécifie la méthode de base de l'essai de dureté Rockwell, y compris les procédures d'essai, les exigences en matière d'équipement et l'expression des résultats pour les plages A, B, C et autres.

ISO 6508- 2:2015 : décrit en détail les méthodes et les procédures d'étalonnage pour la validation des machines d'essai de dureté Rockwell.

ISO 6508-3 :2015 : Spécifie la préparation et l'étalonnage des blocs d'essai standard pour garantir la précision des machines d'essai.

Ne convient pas aux matériaux non métalliques ni aux tests de micro-dureté (tels que la dureté Vickers ou Knoop).

2 Références normatives

Les documents suivants sont indispensables à l'application de cette norme :

ISO 6507-1:2018 Essai de dureté Vickers pour matériaux métalliques — Partie 1 : Méthode d'essai machines d'essai pour les essais de traction des matériaux métalliques — Partie mesure de force

ISO 376:2011 Étalonnage des étalons de force pour les essais de traction des matériaux métalliques

3 Termes et définitions

Français Les termes et définitions suivants s'appliquent à la présente norme (référéncée dans l'ISO 6507 et les normes connexes) :

3.1 Dureté Rockwell La résistance d'un matériau métallique à la pénétration par un pénétrateur, exprimée sous la forme d'une valeur de dureté Rockwell (HR), en fonction de la portée et du type de pénétrateur. 3.2 Précharge

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

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

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

La force initiale appliquée à l'échantillon pour stabiliser le contact, généralement 10 kgf (98,07 N).

3.3 Force d'essai totale La force totale de la précharge plus la charge supplémentaire, telle que 60 kgf (588,4 N), 100 kgf (980,7 N) ou 150 kgf (1471 N).

3.4 Échelle La plage d'essai de dureté définie par la combinaison du pénétrateur et de la charge, telle que HRA (cône diamant, 60 kgf), HRB (bille d'acier de 1/16 pouce, 100 kgf), HRC (cône diamant, 150 kgf).

4 Méthode d'essai (ISO 6508-1:2016)

4.1 Équipement

Duromètre : Duromètre Rockwell conforme à la norme ISO 6508-2, équipé d'un cône diamant (angle au sommet 120°) ou d'un pénétrateur à bille d'acier (diamètre 1/16 pouce, 1/8 pouce, etc.).

Charge : Précharge 10 kgf $\pm$ 0,1 kgf, charge principale sélectionnée selon la gamme (60, 100 ou 150 kgf $\pm$ 0,5 kgf).

Conditions environnementales : température 23°C $\pm$ 5°C, humidité < 65%.

4.2 Exigences relatives à l'échantillon

Planéité de surface $\leq$ 0,01 mm, rugosité Ra $\leq$ 0,8 μ m.

Épaisseur : L'épaisseur minimale dépend de la plage de mesure (par exemple, HRC doit être $\geq$ 1,5 mm).

Erreur de parallélisme $\leq$ 0,01 mm.

4.3 Procédure d'essai

Installez l'échantillon en vous assurant que la surface est propre et exempte d'huile.

Appliquez la précharge et maintenez-la pendant 1 à 5 secondes.

Appliquez la charge principale et maintenez-la pendant 2 à 8 secondes (ajustez en fonction de la dureté du matériau).

Décharger pour précharger et lire la valeur de dureté.

Répétez la mesure 3 à 5 fois et prenez la valeur moyenne.

4.4 Expression des résultats

La valeur de dureté est exprimée en unités HR avec une précision de $\pm 0,5$ HR (HRA, HRC) ou ± 1 HR (HRB).

Le rapport doit inclure la portée, la charge et les conditions d'essai.

5 Vérification et étalonnage (ISO 6508-2:2015)

Méthode de vérification : Utiliser un bloc d'essai standard (ISO 6508-3) pour vérifier l'erreur d'indication du testeur de dureté, avec un écart admissible de ± 1 HR.

Cycle d'étalonnage : Une fois par an, ou immédiatement après le réglage de l'équipement.

Exigences en matière d'équipement : incertitude de mesure de force $\leq \pm 0,5$ %, précision de mesure de profondeur $\leq \pm 0,5$ μ m.

6 blocs d'essai standard (ISO 6508-3:2015)

Préparation : Le matériau du bloc d'essai est cohérent avec le matériau testé et la plage de dureté couvre HRA 20-88, HRB 20-100 et HRC 20-70.

Étalonnage : Déterminé par un laboratoire certifié, incertitude $\leq \pm 0,5$ HR.

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

Utilisation : Calibrez le testeur de dureté avant le test quotidien et enregistrez les résultats.

7 applications

Évaluation des matériaux : utilisé pour les tests de dureté de l'acier (tel que l'acier au carbone, l'acier à outils), l'alliage d'aluminium et le carbure cémenté (tel que le WC-Co).

Contrôle qualité : S'assurer que les pièces usinées répondent aux exigences de dureté.

Exemple : Le HRA du carbure cémenté WC10Co se situe généralement dans la plage 85-90, ce qui reflète sa dureté élevée et sa résistance à l'usure.

8 Limitations et notes

Ne convient pas aux tôles minces (épaisseur $< 0,1$ mm) ou aux matériaux avec une épaisseur de couche superficielle durcie $< 0,1$ mm.

Les résultats sont affectés par l'état de la surface et le moment d'application de la charge et doivent être strictement contrôlés.

Interchangeabilité limitée avec la dureté Vickers (ISO 6507) ou la dureté Brinell (ISO 6506).

9 Rapport de test

Le rapport doit inclure :

Matériau de l'échantillon et état de surface.

Plage de test, temps de charge et de maintien.

Valeurs de dureté (moyenne et écart type).

Date du test, modèle d'équipement et signature de l'opérateur.

Annexe (informative)

Annexe A : Données typiques

Acier au carbone (HRB) : 70 ± 1

Acier trempé (HRC) : $50 \pm 0,5$

WC10Co (HRA) : $88 \pm 0,5$

illustrer

La norme ISO 6508-1:2016 fournit les principales méthodes d'essai et, avec les normes ISO 6508-2 et ISO 6508-3, forme un système complet.

Cette norme est confirmée comme étant en vigueur en 2021 et pourra être mise à jour à l'avenir en fonction des nouvelles technologies et des nouveaux équipements.

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

appendice:

Norme internationale
ISO 6508-3:2015 Matériaux métalliques — Essai de dureté Rockwell — Partie 3 :
Étalonnage des blocs de référence

Aperçu

L'ISO 6508-3:2015 est une norme élaborée par l'Organisation internationale de normalisation (ISO) et intitulée « Matériaux métalliques – Essai de dureté Rockwell – Partie 3 : Préparation et étalonnage des blocs d'essai étalons ». Publiée le 15 octobre 2015, elle entrera en vigueur en 2020. Élaborée par l'ISO/TC 164/SC 3 (sous-comité des essais mécaniques), la série ISO 6508 est une norme en plusieurs parties (incluant les normes ISO 6508-1, ISO 6508-2 et ISO 6508-3) visant à normaliser la méthode d'essai de dureté Rockwell pour les matériaux métalliques. Cette partie spécifie les exigences de préparation, d'étalonnage et d'utilisation des blocs d'essai étalons afin de garantir la précision et la fiabilité des machines d'essai de dureté Rockwell. Elle convient à la mesure de la dureté des matériaux métalliques tels que l'acier, l'aluminium et le carbure cémenté.

1 Portée

Objets applicables : Convient aux blocs de test standard de référence utilisés pour le test de dureté Rockwell, couvrant l'acier, la fonte, les métaux non ferreux et leurs alliages.

Objectif : Spécifier la préparation, l'étalonnage et l'utilisation de blocs d'essai standard pour vérifier la précision de mesure de la machine d'essai.

Non applicable : Non applicable aux éprouvettes non métalliques ou aux tests de microdureté (tels que la dureté Vickers ou Knoop).

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 6508-1:2016 Matériaux métalliques — Essai de dureté Rockwell — Partie 1 : Méthode d'essai

ISO 6508-2:2015 Matériaux métalliques — Essai de dureté Rockwell — Partie 2 : Vérification et étalonnage des machines d'essai

ISO 376:2011 Matériaux métalliques — Étalonnage des étalons de force pour les essais de traction

3 Termes et définitions

Les termes et définitions suivants s'appliquent à la présente norme :

3.1 Bloc d'essai standard

Matériau de référence avec une valeur de dureté connue utilisé pour étalonner la machine d'essai de dureté Rockwell.

3.2 Étalonnage

Vérifie la précision des résultats de mesure de la machine d'essai en mesurant la valeur de dureté du bloc d'essai standard.

3.3 Plage

La plage d'essai de dureté définie par la combinaison du pénétrateur et de la charge, telle que HRA, HRB, HRC.

3.4 Incertitude

Le degré de dispersion des résultats de mesure pendant l'étalonnage, généralement avec un niveau

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

de confiance de 95 %.

4 Préparation des blocs d'essai standard

4.1 Exigences matérielles

Matériau : Choisissez des matériaux métalliques avec une bonne uniformité, tels que l'acier trempé, l'alliage d'aluminium ou le carbure cémenté.

Plage de dureté : couvrez les principales plages, telles que HRC 20-70, HRB 20-100, HRA 20-88.

4.2 Dimensions et traitement de surface

Dimensions : Épaisseur ≥ 6 mm, surface plane ≥ 25 mm $\times$ 25 mm.

Traitement de surface : polissage mécanique, rugosité $R_a \leq 0,8 \mu\text{m}$, erreur de planéité $\leq 0,01$ mm.

Nettoyage : Essuyer avec de l'éthanol ou de l'acétone pour éliminer les taches d'huile.

4.3 Traitement thermique

Effectuer un traitement thermique (tel que la trempe et le revenu) en fonction des caractéristiques du matériau pour garantir une dureté uniforme.

5 Exigences d'étalonnage

5.1 Équipement d'étalonnage

Machine d'essai de dureté Rockwell selon ISO 6508-2, complète avec dispositif d'étalonnage.

Conditions environnementales : température $23^\circ\text{C} \pm 5^\circ\text{C}$, humidité $< 65\%$.

5.2 Procédure d'étalonnage

Sélectionnez un bloc de test standard avec une plage appropriée (tel que le bloc de test HRC).

5 à 10 points de mesure sur la surface du bloc d'essai.

Appliquez la force de pré-test ($10 \text{ kgf} \pm 0,1 \text{ kgf}$) et la force d'essai principale (60, 100 ou $150 \text{ kgf} \pm 0,5 \text{ kgf}$).

Enregistrez la valeur de dureté pour chaque mesure et conservez-la pendant 2 à 8 secondes.

Calculez la moyenne et l'écart type.

5.3 Critères d'acceptation

L'écart entre la valeur mesurée et la valeur indiquée dans le certificat est $\leq \pm 1$ HR.

Écart type $\leq 0,5$ HR (HRA, HRC) ou ≤ 1 HR (HRB).

6 Traitement des données

6.1 Valeur de dureté

Valeur moyenne : Prendre la valeur moyenne de 5 à 10 mesures, avec une précision de $\pm 0,5$ HR (HRA, HRC) ou ± 1 HR (HRB).

Incertitude : Évaluez l'équipement, le fonctionnement et les effets environnementaux avec un niveau de confiance de 95 %.

6.2 Rapport d'étalonnage

Comprend le matériau du bloc de test, la plage de dureté, la valeur de mesure et l'incertitude.

7 Rapport de test

Le rapport de test doit inclure les éléments suivants :

Matériaux et plages de dureté des blocs d'essai standard.

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

Conditions d'étalonnage (par exemple, plage, force d'essai principale) .

Résultats de mesure (moyenne, écart type, incertitude).

Date du test, modèle d'équipement et signature de l'opérateur.

8 Annexe (informative)

Annexe A : Données typiques

d'essai en acier trempé : HRC $50 \pm 0,5$, écart type 0,3 HR.

Bloc d'essai en alliage d'aluminium : HRB 80 ± 1 , écart type 0,8 HR.

illustrer

Série Norme:

La norme ISO 6508-1:2016 fournit les principales méthodes d'essai.

La norme ISO 6508-2:2015 spécifie la vérification et l'étalonnage des machines d'essai.

La norme ISO 6508-3:2015 spécifie la préparation et l'étalonnage des blocs d'essai standard.

Validité : La validité de la norme ISO 6508-3:2015 est confirmée en 2020 et peut être mise à jour à l'avenir en fonction des avancées technologiques.

Où l'obtenir : Le texte standard peut être acheté sur le site officiel de l'ISO.

Remarque : lors de la mise en œuvre, assurez-vous que le bloc de test correspond à la machine de test et consultez des techniciens professionnels.

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

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

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

appendice:

Norme internationale

ISO 6508-1:2016 Matériaux métalliques — Essai de dureté Rockwell — Partie 1 : Méthode d'essai

Aperçu

L'ISO 6508-1:2016 est une norme élaborée par l'Organisation internationale de normalisation (ISO) et intitulée « Matériaux métalliques – Essai de dureté Rockwell – Partie 1 : Méthode d'essai ». Publiée le 15 octobre 2016, elle remplace l'ISO 6508-1:2005 et sa validité est confirmée en 2021. Élaborée par l'ISO/TC 164/SC 3 (Sous-comité Essais des propriétés mécaniques), la série ISO 6508 est une norme en plusieurs parties (incluant les ISO 6508-1, ISO 6508-2 et ISO 6508-3) visant à normaliser la méthode d'essai de dureté Rockwell pour les matériaux métalliques. Cette partie spécifie la procédure d'essai, les exigences relatives à l'équipement et l'expression des résultats. Elle s'applique à l'évaluation de la dureté des matériaux métalliques tels que l'acier, l'aluminium et le carbure cémenté.

1 Portée

Objets applicables : Convient aux matériaux métalliques (tels que l'acier, la fonte, les métaux non ferreux et leurs alliages), y compris le carbure cémenté.

Objectif : L'essai de dureté Rockwell permet de mesurer la résistance d'un matériau à l'indentation. Il est adapté au contrôle qualité et à l'évaluation des performances des matériaux.

Non applicable : Ne convient pas aux matériaux non métalliques ou aux tests de micro-dureté (tels que la dureté Vickers ou Knoop).

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 6507-1:2018 Matériaux métalliques — Essai de dureté Vickers — Partie 1 : Méthode d'essai

ISO 7500-1:2015 Matériaux métalliques — Étalonnage et vérification des machines d'essai de traction — Partie mesure de la force

ISO 376:2011 Matériaux métalliques — Étalonnage des étalons de force pour les essais de traction

3 Termes et définitions

Les termes et définitions suivants s'appliquent à la présente norme :

3.1 Dureté Rockwell

La résistance d'un matériau métallique à la pénétration d'un pénétrateur, exprimée par une valeur de dureté Rockwell, qui dépend de la portée et du type de pénétrateur.

3.2 Force de pré-essai
La force initiale appliquée à l'échantillon pour stabiliser le contact, généralement 10 kgf.

3.3 Force d'essai totale
La force totale de la précharge plus la charge supplémentaire, telle que 60 kgf, 100 kgf ou 150 kgf.

3.4 Plage

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

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

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

La plage d'essai de dureté définie par la combinaison du pénétrateur et de la charge, telle que HRA (cône de diamant, 60 kgf), HRB (bille d'acier de 1/16 pouce, 100 kgf), HRC (cône de diamant, 150 kgf).

4 Préparation expérimentale

4.1 Spécimen

Matériaux : Matériaux métalliques, notamment acier, aluminium, carbure, etc.

Taille : L'épaisseur minimale dépend de la plage de mesure (par exemple, le HRC doit être $\geq 1,5$ mm), zone plane $\geq 25 \text{ mm} \times 25 \text{ mm}$.

Quantité : Au moins 3 mesures par groupe.

4.2 Traitement des échantillons

Traitement de surface : polissage mécanique ou ponçage au papier de verre, rugosité $R_a \leq 0,8 \mu\text{m}$.

Nettoyage : Essuyer avec de l'éthanol ou de l'acétone pour éliminer les taches d'huile.

Planéité : Erreur de planéité de surface $\leq 0,01 \text{ mm}$.

4.3 Équipement

Duromètre : Duromètre Rockwell conforme à la norme ISO 6508-2, équipé d'un cône diamant (angle au sommet 120°) ou d'un pénétrateur à bille d'acier (diamètre 1/16" ou 1/8").

Conditions environnementales : température $23^\circ\text{C} \pm 5^\circ\text{C}$, humidité $< 65\%$.

5 Méthodes d'essai

5.1 Procédure d'essai

Installer l'échantillon en veillant à l'aligner avec le pénétrateur.

Appliquer une force de pré-test ($10 \text{ kgf} \pm 0,1 \text{ kgf}$) et stabiliser pendant 1 à 5 secondes.

Appliquer la force d'essai principale (60, 100 ou $150 \text{ kgf} \pm 0,5 \text{ kgf}$) et maintenir pendant 2 à 8 secondes (ajustée en fonction de la dureté du matériau).

Déchargez jusqu'à la force de pré-test et lisez la valeur de dureté.

Répétez la mesure 3 à 5 fois et prenez la valeur moyenne.

5.2 Sélection de la plage

HRA : Cône diamant, 60 kgf, adapté aux matériaux durs (HRA 20-88).

HRB : bille d'acier de 1/16 pouce, 100 kgf, adaptée aux matériaux de dureté moyenne (HRB 20-100).

HRC : Cône diamanté, 150 kgf, pour acier dur (HRC 20-70).

D'autres gammes (telles que HRD, HRE) peuvent être sélectionnées selon les besoins.

5.3 Contrôle environnemental

Évitez les vibrations et les fluctuations de température et gardez la surface de l'échantillon sèche.

6 Traitement des données

6.1 Valeur de dureté

Calcul : La valeur de dureté est lue directement à partir du testeur de dureté en HR (HRA, HRB, HRC, etc.).

Valeur moyenne : Prendre la valeur moyenne de 3 à 5 mesures, avec une précision de $\pm 0,5 \text{ HR}$ (HRA, HRC) ou $\pm 1 \text{ HR}$ (HRB).

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

6.2 Incertitude

Évaluer les erreurs causées par l'équipement, le fonctionnement et l'état de surface de l'échantillon avec un niveau de confiance de 95 %. Incertitude typique $\leq \pm 1$ H.

7 Rapport de test

Le rapport de test doit inclure les éléments suivants :

Matériau de l'échantillon et état de surface. Plage d'essai, force d'essai principale et temps de maintien. Valeur de dureté (valeur moyenne et écart type).

Date du test, modèle d'équipement et signature de l'opérateur.

8 Annexe (informative)

Annexe A : Données typiques

Acier au carbone : HRB 80 $\pm$ 1. Acier trempé : HRC 50 $\pm$ 0,5. WC10Co : HRA 88 $\pm$ 0,5.

illustrer

Série Norme:

La norme ISO 6508-1:2016 décrit les principales méthodes d'essai. La norme ISO 6508-2:2015 précise les procédures de vérification et d'étalonnage.

La norme ISO 6508-3:2015 spécifie la préparation de blocs d'essai standard.

Validité : La norme ISO 6508-1:2016 est valable à partir de 2021 et peut être mise à jour à l'avenir en fonction des nouvelles technologies et des nouveaux équipements.

être acheté via le site officiel de l'ISO.

Remarque : lors de la mise en œuvre, veuillez vous référer aux propriétés spécifiques du matériau et aux résultats d'étalonnage de l'équipement, et consulter des techniciens professionnels.

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

appendice:

Méthode d'essai standard ASTM G59 pour la réalisation de mesures de résistance de polarisation potentiodynamique

Aperçu

La norme ASTM G59, développée par l'American Society for Testing and Materials (ASTM International), est intitulée « Méthode d'essai standard pour la réalisation de mesures de résistance à la polarisation potentiodynamique ». Publiée initialement le 10 novembre 1997, la dernière version, **ASTM G59-97(2014)**, a été publiée le 1er juin 2014 et devrait entrer en vigueur en 2023. Développée par le comité ASTM G01 (Corrosion des métaux), la norme ASTM G59 propose une méthode de laboratoire permettant d'évaluer la vitesse et la tendance à la corrosion des métaux et alliages en milieu corrosif, par des mesures de résistance à la polarisation potentiodynamique. Cette norme est adaptée à l'étude des mécanismes de corrosion, au criblage des matériaux et au contrôle qualité.

1 Portée

Objets applicables : Convient aux tests de comportement à la corrosion des métaux et alliages (tels que l'acier, l'acier inoxydable, l'aluminium, l'alliage dur, etc.) dans les solutions électrolytiques.

Objectif : Estimer la densité de courant de corrosion (i_{corr}) et le taux de corrosion en mesurant la résistance de polarisation.

Non applicable : Ne convient pas aux tests de corrosion de matériaux non conducteurs ou dans des conditions extrêmes (telles que le sel fondu à haute température).

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.

ASTM G3-14 Pratique standard pour la préparation, la conduite et l'analyse des résultats des essais de corrosion en laboratoire

Méthode d'essai de référence standard ASTM G5-14 : polarisation potentiodynamique

Norme ASTM E691-22 : Évaluation de la comparabilité des données d'essai

3 Termes et définitions

Les termes et définitions suivants s'appliquent à la présente norme :

3.1 Résistance de polarisation (R_p)

Le rapport entre la densité de courant et la différence de potentiel lorsqu'un petit changement de potentiel est appliqué à proximité du potentiel de corrosion, l'unité est $\Omega \cdot \text{cm}^2$.

3.2 Densité de courant de corrosion (i_{corr})

La densité de courant à travers la réaction de corrosion par unité de surface, l'unité est $\mu\text{A}/\text{cm}^2$, utilisée pour estimer le taux de corrosion.

3.3 Potentiel de corrosion (E_{corr})

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

Le potentiel d'équilibre d'un métal dans un électrolyte sans courant appliqué, l'unité est le mV (par rapport à l'électrode de référence).

4 Préparation expérimentale

4.1 Spécimen

Matériau : Métal ou alliage, tel que l'acier au carbone, l'acier inoxydable 304, le carbure WC-Co.

Taille : Surface exposée $1 \text{ cm}^2 \pm 0,1 \text{ cm}^2$, ou selon accord.

Quantité : Chaque groupe d'expériences a été répété 3 fois.

4.2 Traitement des échantillons

Traitement de surface : Polissage mécanique à $Ra \leq 0,8 \mu\text{m}$, rinçage à l'eau distillée après nettoyage.

Montage : Insérez l'échantillon dans le porte-électrode en vous assurant qu'il n'y a pas de bulles sur la surface exposée.

4.3 Électrolytes

Solution : telle qu'une solution de NaCl à 3,5 % (fraction massique), pH 6,5-7,0, ou déterminée par accord.

Désoxygénation : Si nécessaire, purger à l'azote pendant 15 minutes pour éliminer l'oxygène dissous.

Température : $23^\circ\text{C} \pm 2^\circ\text{C}$, ou selon le protocole.

4.4 Équipement

Poste de travail électrochimique : Avec fonctions de contrôle de potentiel (précision $\pm 0,1 \text{ mV}$) et de mesure de courant (précision $\pm 0,1 \mu\text{A}$).

Système d'électrodes :

Électrode de travail : échantillon.

Électrode de référence : électrode au calomel saturé (ECS) ou électrode Ag/AgCl.

Électrode auxiliaire : électrode en platine.

5 Méthodes d'essai

5.1 Procédure d'essai

Installez le système d'électrodes, plongez-le dans l'électrolyte et stabilisez-le pendant 1 heure jusqu'à ce que E_{corr} se stabilise (taux de variation $< 0,1 \text{ mV/min}$).

E_{corr} initial.

L'analyse dynamique potentielle a été réalisée dans la plage de $E_{\text{corr}} \pm 10 \text{ mV}$ à une vitesse de balayage de $0,166 \text{ mV/s} \pm 0,002 \text{ mV/s}$.

Enregistrez la courbe densité-potential de courant.

Déchargez l'électrode et nettoyez l'échantillon.

5.2 Réglages des paramètres

Plage de balayage : $E_{\text{corr}} \pm 10 \text{ mV}$ (région linéaire).

Intervalle d'échantillonnage : $\leq 0,1 \text{ mV}$.

Contrôle environnemental : éviter les vibrations et les interférences électromagnétiques.

6 Traitement des données

6.1 Calcul de la résistance de polarisation

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

formule :

$$R_p = \frac{\Delta E}{\Delta I}$$

其中, ΔE 为电位变化 (mV), ΔI 为相应电流变化 ($\mu\text{A}/\text{cm}^2$), R_p 单位为 $\Omega \cdot \text{cm}^2$.

Mesure : Extraire la pente de la région linéaire de la courbe.

6.2 Estimation de la densité de courant de corrosion

Formule de Stern-Gibbs :

$$i_{\text{corr}} = \frac{B}{R_p}$$

其中, B 为常数 (通常 26 mV 对于活性腐蚀, 52 mV 对于钝化系统), i_{corr} 单位为 $\mu\text{A}/\text{cm}^2$.

Précision : $\pm 10\%$.

6.3 Incertitude

Évaluer les effets de la stabilité de l'électrode et de la pureté de la solution avec un niveau de confiance de 95 %.

7 Rapport de test

Le rapport de test doit inclure les éléments suivants :

Matériau de l'échantillon et état de surface.

Composition de l'électrolyte, température et pH.

Taux de balayage, portée et $E_{\text{correction}}$ valeur.

R_p et i_{corr} résultats et incertitudes.

Date du test, modèle d'équipement et signature de l'opérateur.

8 Annexe (informative)

Annexe A : Données typiques

碳钢 (3.5% NaCl): $E_{\text{corr}} = -650 \text{ mV (SCE)}$, $R_p = 500 \Omega \cdot \text{cm}^2$, $i_{\text{corr}} = 52 \mu\text{A}/\text{cm}^2$.

304 不锈钢 (3.5% NaCl): $E_{\text{corr}} = -200 \text{ mV (SCE)}$, $R_p = 2000 \Omega \cdot \text{cm}^2$, $i_{\text{corr}} = 13 \mu\text{A}/\text{cm}^2$.

WC10Co (3.5% NaCl): $E_{\text{corr}} = -300 \text{ mV (SCE)}$, $R_p = 1500 \Omega \cdot \text{cm}^2$, $i_{\text{corr}} = 17 \mu\text{A}/\text{cm}^2$.

illustrer

Liens vers les normes connexes : ASTM G59 est utilisé en conjonction avec ASTM G5 (polarisation potentiodynamique) pour fournir une analyse complète du comportement à la corrosion.

Limitations : Linéarité supposée uniquement pour une petite plage de potentiel, au-delà de $\pm 10 \text{ mV}$, une référence à la norme ASTM G5 peut être requise.

Validité : La norme ASTM G59-97 (2014) est confirmée comme étant valide en 2023 et peut être mise à jour à l'avenir en fonction de la technologie électrochimique.

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

appendice:

**ASTM G3-14 Pratique standard
pour les conventions applicables aux mesures électrochimiques dans les essais de corrosion**

Aperçu

La norme ASTM G3-14, élaborée par l'American Society for Testing and Materials (ASTM International), est intitulée « Pratique standard pour les conventions applicables aux mesures électrochimiques lors des essais de corrosion ». Publiée le 1er mai 2014, la dernière version, **ASTM G3-14 (2024)**, a été publiée le 1er janvier 2024 et son entrée en vigueur est confirmée en 2024. La norme ASTM G3 a été élaborée par le comité ASTM G01 (Métaux corrosifs) afin d'uniformiser les conventions, la terminologie et les procédures pour les mesures électrochimiques lors des essais de corrosion en laboratoire, afin de garantir la répétabilité et la comparabilité des résultats. Cette norme s'applique aux essais électrochimiques des métaux et alliages dans divers environnements corrosifs.

1 Portée

Objets applicables : Convient aux tests de corrosion électrochimique des métaux et alliages (tels que l'acier, l'acier inoxydable, l'aluminium, l'alliage dur, etc.) dans les solutions électrolytiques.

Objectif : Normaliser la préparation, le fonctionnement et l'analyse des mesures électrochimiques, y compris le système d'électrodes, la configuration de l'instrument et l'interprétation des données.

Non applicable : Non applicable aux essais de corrosion non électrochimiques (tels que les essais au brouillard salin) ou 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.

Méthode d'essai de référence standard ASTM G5-14 : polarisation potentiodynamique

Méthode d'essai standard ASTM G59-97(2014) : Mesure de la résistance de polarisation potentiodynamique

Norme ASTM E691-22 : Évaluation de la comparabilité des données d'essai

3 Termes et définitions

Les termes et définitions suivants s'appliquent à la présente norme :

3.1 Cellule électrochimique

Dispositif utilisé pour les mesures électrochimiques, comprenant une électrode de travail, une électrode de référence et une électrode auxiliaire. 3.2 **Potentiel de corrosion** (E_{corr})

Potentiel d'équilibre d'un métal dans un électrolyte sans courant appliqué, exprimé en mV (par rapport à l'électrode de référence). 3.3 **Résistance de polarisation** (R_p)

Le rapport entre la variation de potentiel et la variation correspondante de courant, exprimé en $\Omega \cdot \text{cm}^2$, utilisé pour estimer le taux de corrosion.

3.4 Électrode de référence

Une électrode qui fournit une référence de potentiel stable, telle qu'une électrode au calomel saturé

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

(SCE) ou une électrode Ag/AgCl.

4 Préparation expérimentale

4.1 Spécimen

Matériau : Métal ou alliage, tel que l'acier au carbone, l'acier inoxydable 304, le carbure WC-Co.

Taille : Surface exposée $1 \text{ cm}^2 \pm 0,1 \text{ cm}^2$, ou selon accord.

Quantité : Chaque groupe d'expériences a été répété 3 fois.

4.2 Traitement des échantillons

Traitement de surface : Polissage mécanique à $Ra \leq 0,8 \mu\text{m}$, rincer à l'eau distillée après nettoyage et sécher pour utilisation.

Montage : Insérez l'échantillon dans le porte-électrode en vous assurant qu'il n'y a pas de bulles ou de contamination sur la surface exposée.

4.3 Électrolytes

Solution : telle qu'une solution de NaCl à 3,5 % (fraction massique), pH 6,5-7,0, ou déterminée par accord.

Pureté : Utiliser de l'eau déionisée avec une conductivité $\leq 1 \mu\text{S}/\text{cm}$.

Température : $23^\circ\text{C} \pm 2^\circ\text{C}$, ou selon le protocole.

4.4 Équipement électrochimique

Poste de travail : Avec fonctions de contrôle de potentiel (précision $\pm 0,1 \text{ mV}$) et de mesure de courant (précision $\pm 0,1 \mu\text{A}$).

Système d'électrodes :

Électrode de travail : échantillon.

Électrode de référence : électrode SCE ou Ag/AgCl.

Électrode auxiliaire : électrode en platine ou en graphite.

Mise à la terre : Assurez-vous que le système est mis à la terre pour réduire les interférences sonores.

5 Test de fonctionnement

5.1 Assemblage de cellules électrochimiques

Assurez-vous que la distance entre les électrodes est appropriée (électrode de travail à électrode de référence $\leq 5 \text{ mm}$).

Vérifiez l'étanchéité pour éviter les fuites de solution.

5.2 Stabilité initiale

Plonger dans l'électrolyte pendant 1 heure jusqu'à ce que E_{corr} se stabilise (taux de variation $< 0,1 \text{ mV}/\text{min}$).

E_{corr} initial.

5.3 Procédure de mesure

Potentiel de circuit ouvert (OCP) : Enregistrez la variation de E_{corr} dans les 30 minutes.

Résistance à la polarisation : Selon la norme ASTM G59, la plage de balayage est $E_{\text{corr}} \pm 10 \text{ mV}$, et le taux est de $0,166 \text{ mV}/\text{s} \pm 0,002 \text{ mV}/\text{s}$.

Polarisation dynamique potentielle : Selon la norme ASTM G5, la plage de balayage est $E_{\text{corr}} \pm 250 \text{ mV}$ et le taux est de $0,5 \text{ mV}/\text{s} \pm 0,05 \text{ mV}/\text{s}$.

5.4 Contrôle environnemental

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

Évitez les vibrations, les fluctuations de température ($\pm 1^{\circ}\text{C}$) et les interférences électromagnétiques.

6 Analyse des données

6.1 Potentiel de corrosion

Prendre la stabilité Valeur moyenne de E_{corr} , précision $\pm 1 \text{ mV}$.

6.2 Résistance de polarisation

$$R_p = \frac{\Delta E}{\Delta I}$$

其中, ΔE 为电位变化 (mV), ΔI 为相应电流变化 ($\mu\text{A}/\text{cm}^2$), R_p 单位为 $\Omega \cdot \text{cm}^2$.

精度: $\pm 5\%$.

6.3 Densité de courant de corrosion

Formule de Stern-Gibbs :

$$i_{\text{corr}} = \frac{B}{R_p}$$

其中, B 为常数 (26 mV 或 52 mV, 取决于腐蚀类型), i_{corr} 单位为 $\mu\text{A}/\text{cm}^2$.

Précision : $\pm 10\%$.

6.4 Incertitude

Évaluez les effets de la dérive de l'électrode, de la pureté de la solution et de la précision de l'instrument avec un niveau de confiance de 95 %.

6.5 Analyse des courbes

Tracez la courbe de densité de potentiel-courant pour identifier les régions passives ou actives.

7 Rapport de test

Le rapport de test doit inclure les éléments suivants :

Matériau de l'échantillon et état de surface.

Composition de l'électrolyte, température et pH.

Paramètres de mesure (par exemple, taux de balayage, plage).

E_{corr} , R_p et i_{corr} résultats et incertitudes.

Date du test, modèle d'équipement et signature de l'opérateur.

8 Annexe (informative)

Annexe A : Données typiques

碳钢 (3.5% NaCl): $E_{\text{corr}} = -650 \text{ mV (SCE)}$, $R_p = 500 \Omega \cdot \text{cm}^2$, $i_{\text{corr}} = 52 \mu\text{A}/\text{cm}^2$.

304 不锈钢 (3.5% NaCl): $E_{\text{corr}} = -200 \text{ mV (SCE)}$, $R_p = 2000 \Omega \cdot \text{cm}^2$, $i_{\text{corr}} = 13 \mu\text{A}/\text{cm}^2$.

WC10Co (3.5% NaCl): $E_{\text{corr}} = -300 \text{ mV (SCE)}$, $R_p = 1500 \Omega \cdot \text{cm}^2$, $i_{\text{corr}} = 17 \mu\text{A}/\text{cm}^2$.

Annexe B : Étalonnage des électrodes

L'électrode de référence a été calibrée régulièrement avec une solution standard de potentiel connu avec une erreur de $\leq \pm 2 \text{ mV}$.

illustrer

Relation avec les normes connexes : ASTM G3-14 fournit la pratique de base pour les tests électrochimiques tels que ASTM G5 et G59, en mettant l'accent sur la cohérence.

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

Limites : Les résultats sont affectés par la composition de l'électrolyte et l'état de surface de l'échantillon, et les conditions doivent être strictement contrôlées.

Validité : La norme ASTM G3-14(2024) est confirmée comme étant valide en 2024 et peut être mise à jour à l'avenir en fonction de la technologie électrochimique.

appendice:

standard ASTM G5-14
pour la réalisation de mesures de polarisation anodique
potentiodynamique

Aperçu

La norme ASTM G5-14, développée par l'American Society for Testing and Materials (ASTM International), est intitulée « Méthode d'essai de référence standard pour la réalisation de mesures de polarisation anodique potentiodynamique ». Publiée le 1er mai 2014, la dernière version, **ASTM G5-14(2021)**, a été publiée le 1er juin 2021 et son entrée en vigueur est prévue pour 2023. Développée par le comité ASTM G01 (Corrosion des métaux), la norme ASTM G5 propose une méthode de laboratoire permettant d'évaluer le comportement anodique, les caractéristiques de passivation et la tendance à la corrosion des métaux et alliages en milieu corrosif par des mesures de polarisation potentiodynamique. Cette norme est adaptée à l'étude des mécanismes de corrosion, au criblage des matériaux et au contrôle qualité.

1 Portée

Objets applicables : Convient pour tester le comportement de polarisation anodique des métaux et alliages (tels que l'acier, l'acier inoxydable, l'aluminium, l'alliage dur, etc.) dans les solutions électrolytiques.

Objectif : Analyser le **potentiel de corrosion**, la zone de passivation et le potentiel de rupture en contrôlant le balayage du potentiel et en mesurant la courbe densité de courant-potentiel.

Non applicable : Ne convient pas aux matériaux non conducteurs ou aux tests de corrosion non électrochimique (tels que l'usure à sec).

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.

ASTM G3-14(2024) Pratique standard pour la préparation, la conduite et l'analyse des essais de corrosion en laboratoire

Méthode d'essai standard ASTM G59-97(2014) : Mesure de la résistance de polarisation potentiodynamique

Norme ASTM E691-22 : Évaluation de la comparabilité des données d'essai

3 Termes et définitions

Les termes et définitions suivants s'appliquent à la présente norme :

3.1 Polarisation

potentiodynamique La relation entre la densité de courant et le potentiel est mesurée en contrôlant le potentiel pour qu'il change à un taux constant. 3.2 **Potentiel de corrosion** (E_{corr})

Potentiel d'équilibre d'un métal dans un électrolyte sans courant appliqué, en mV (par rapport à l'électrode de référence). 3.3 **Potentiel de passivation** (E_{passer})

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

Potentiel auquel la densité de courant commence à chuter de manière significative après que le potentiel est atteint, en mV.

3.4 Potentiel de claquage (E_b)

Le potentiel auquel le film passif se décompose, entraînant une forte augmentation du courant, en mV.

4 Préparation expérimentale

4.1 Spécimen

Matériau : Métal ou alliage, tel que l'acier au carbone, l'acier inoxydable 304, le carbure WC-Co.

Taille : Surface exposée $1 \text{ cm}^2 \pm 0,1 \text{ cm}^2$, ou selon accord.

Quantité : Chaque groupe d'expériences a été répété 3 fois.

4.2 Traitement des échantillons

Traitement de surface : Polissage mécanique à $Ra \leq 0,8 \mu\text{m}$, rincer à l'eau distillée après nettoyage et sécher pour utilisation.

Montage : Insérez l'échantillon dans le porte-électrode en vous assurant qu'il n'y a pas de bulles ou de contamination sur la surface exposée.

4.3 Électrolytes

Solution : telle qu'une solution de NaCl à 3,5 % (fraction massique), pH 6,5-7,0, ou déterminée par accord.

Pureté : Utiliser de l'eau déionisée avec une conductivité $\leq 1 \mu\text{S}/\text{cm}$.

Température : $23^\circ\text{C} \pm 2^\circ\text{C}$, ou selon le protocole.

4.4 Équipement électrochimique

Poste de travail : Avec fonctions de contrôle de potentiel (précision $\pm 0,1 \text{ mV}$) et de mesure de courant (précision $\pm 0,1 \mu\text{A}$).

Système d'électrodes :

Électrode de travail : échantillon.

Électrode de référence : électrode au calomel saturé (ECS) ou électrode Ag/AgCl.

Électrode auxiliaire : électrode en platine ou en graphite.

Mise à la terre : Assurez-vous que le système est mis à la terre pour réduire les interférences sonores.

5 Méthodes d'essai

5.1 Procédure d'essai

Installez le système d'électrodes, plongez-le dans l'électrolyte et stabilisez-le pendant 1 heure jusqu'à ce que E_{corr} se stabilise (taux de variation $< 0,1 \text{ mV}/\text{min}$).

E_{corr} initial.

$E_{\text{corr}} - 50 \text{ mV}$ et balayage anodique vers $E_{\text{corr}} + 1500 \text{ mV}$ ou une densité de courant de $1 \text{ mA}/\text{cm}^2$ à une vitesse de balayage de $0,167 \text{ mV}/\text{s} \pm 0,002 \text{ mV}/\text{s}$.

Enregistrez la courbe densité-potentiel de courant.

Déchargez l'électrode et nettoyez l'échantillon.

5.2 Réglages des paramètres

Plage de balayage : $E_{\text{corr}} - 50 \text{ mV}$ à $E_{\text{corr}} + 1500 \text{ mV}$, soit à une densité de courant de $1 \text{ mA}/\text{cm}^2$.

Intervalle d'échantillonnage : $\leq 0,1 \text{ mV}$.

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

Contrôle environnemental : Eviter les vibrations et les variations de température ($\pm 1^{\circ}\text{C}$).

6 Analyse des données

6.1 Potentiel clé

E_{corr} : Enregistrez le point de départ de la courbe, avec une précision de $\pm 1 \text{ mV}$.

E_{pass} : Déterminer le potentiel auquel la densité de courant chute à une valeur stable, avec une précision de $\pm 5 \text{ mV}$.

E_b : Identifie le potentiel de rupture auquel le courant augmente brusquement, avec une précision de $\pm 5 \text{ mV}$.

6.2 Densité de courant

La densité de courant dans les régions d'anode et de cathode est enregistrée en $\mu\text{A}/\text{cm}^2$ avec une précision de $\pm 1 \mu\text{A}/\text{cm}^2$.

6.3 Estimation du taux de corrosion

Extrapolation de Tafel : Extraire les pentes de Tafel anodique et cathodique de la courbe et calculer i_{corr} .

$$i_{\text{corr}} = 10^{\frac{E_{\text{corr}} - a}{b_a} + \log i_a}$$

其中, a 和 b_a 分别为阴极和阳极塔菲尔常数, i_a 为阳极电流密度。

Précision : $\pm 10\%$.

6.4 Incertitude

Évaluez les effets de la dérive de l'électrode, de la pureté de la solution et de la précision de l'instrument avec un niveau de confiance de 95 %.

7 Rapport de test

Le rapport de test doit inclure les éléments suivants :

Matériau de l'échantillon et état de surface.

Composition de l'électrolyte, température et pH.

Taux de balayage, portée et correction E valeur.

E_{pass} , i_{corr} résultats et incertitudes.

Date du test, modèle d'équipement et signature de l'opérateur.

8 Annexe (informative)

Annexe A : Données typiques

碳钢 (3.5% NaCl): $E_{\text{corr}} = -650 \text{ mV (SCE)}$, E_{pass} 不明显, $E_b = -400 \text{ mV}$, $i_{\text{corr}} = 50 \mu\text{A}/\text{cm}^2$.

304 不锈钢 (3.5% NaCl): $E_{\text{corr}} = -200 \text{ mV (SCE)}$, $E_{\text{pass}} = 0 \text{ mV}$, $E_b = 800 \text{ mV}$, $i_{\text{corr}} = 0.5 \mu\text{A}/\text{cm}^2$.

WC10Co (3.5% NaCl): $E_{\text{corr}} = -300 \text{ mV (SCE)}$, $E_{\text{pass}} = 100 \text{ mV}$, $E_b = 900 \text{ mV}$, $i_{\text{corr}} = 1 \mu\text{A}/\text{cm}^2$.

Annexe B : Étalonage des électrodes

L'électrode de référence a été calibrée régulièrement avec une solution standard de potentiel connu

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

avec une erreur de $\leq \pm 2$ mV.

illustrer

Liens vers les normes connexes : La norme ASTM G5-14 est utilisée conjointement avec la norme ASTM G3 et la norme ASTM G59 pour fournir une analyse complète de la corrosion électrochimique.

Limitations : Les résultats sont affectés par la vitesse de balayage et la composition de l'électrolyte et doivent être vérifiés par comparaison avec l'environnement réel.

Validité : La norme ASTM G5-14(2021) est confirmée comme étant valide en 2023 et peut être mise à jour à l'avenir en fonction de la technologie électrochimique.

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

Table des matières

Partie 3 : Optimisation des performances du carbure cimenté

Chapitre 8 : Corrosion et résistance à haute température du carbure cimenté

8.1 Mécanisme de résistance à la corrosion du carbure cimenté

8.1.1 Comportement électrochimique du carbure de tungstène (WC) et de la phase liante dans le carbure cimenté

8.1.2 Environnement acide/brouillard salin du carbure cimenté

8.1.2.1 Principe et aperçu technique

8.1.2.2 Mécanisme et analyse du carbure cimenté en environnement acide/brouillard salin

8.1.2.3 Analyse des facteurs affectant la corrosion du carbure cimenté dans les environnements acides et de brouillard salin

8.1.2.4 Stratégie d'optimisation des effets de corrosion du carbure cimenté dans les environnements acides et de brouillard salin

8.1.2.5 Applications techniques du carbure cimenté dans les environnements acides et de brouillard salin

Conseils sur la corrosion du carbure dans cette section

(1) Chemin de corrosion du carbure cimenté

(2) Le carbure cimenté améliore la protection de surface

(3) Densité des joints de grains du carbure cimenté

(4) Contrainte de corrosion du carbure cimenté

(5) Piqûres sur la surface du carbure cimenté

8.2 Propriétés à haute température du carbure cimenté

8.2.1 Résistance à l'oxydation du carbure cimenté (800-1000°C)

8.2.1.1 Aperçu des principes et des technologies de résistance à l'oxydation du carbure cimenté

8.2.1.2 Mécanisme de résistance à l'oxydation et analyse du carbure cimenté

8.2.1.3 Analyse des facteurs affectant la résistance à l'oxydation du carbure cimenté

8.2.1.4 Stratégie d'optimisation de la résistance à l'oxydation du carbure cimenté

8.2.1.5 Application technique de la résistance à l'oxydation du carbure cimenté

8.2.2 Fatigue thermique et fluage du carbure cimenté

8.2.2.1 Aperçu des principes et des technologies de fatigue thermique et de fluage du carbure cimenté

8.2.2.2 Mécanisme de fatigue thermique et de fluage et analyse du carbure cimenté

8.2.2.3 Facteurs affectant la fatigue thermique et le fluage du carbure cimenté et leurs effets de couplage

8.2.2.4 Stratégies d'optimisation de la fatigue thermique et du fluage pour le carbure cimenté

8.2.2.5 Application technique de l'optimisation des performances de fatigue thermique et de fluage du carbure cimenté

8.3 Méthodes d'optimisation de la résistance à la corrosion et à haute température du carbure cimenté

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

8.3.1 Avantages de la résistance à la corrosion de la phase de liaison à base de Ni dans le carbure cimenté

8.3.1.1 Principe et aperçu technique des avantages de la résistance à la corrosion de la phase de liaison en carbure cimenté à base de Ni

8.3.1.2 Analyse du mécanisme de résistance à la corrosion de la phase de liaison à base de Ni dans le carbure cimenté

8.3.1.3 Analyse microscopique et vérification de la résistance à la corrosion de la phase de liaison à base de Ni dans le carbure cimenté

8.3.1.4 Analyse des facteurs affectant la résistance à la corrosion de la phase de liaison à base de Ni dans le carbure cimenté

8.3.1.5 Optimisation du procédé de préparation de la phase liante à base de Ni

8.3.1.6 Spécification d'essai pour la phase de liaison à base de Ni du carbure cimenté la phase de liaison à base de carbure cimenté Ni

8.3.1.9 Applications techniques de la phase liante en carbure cimenté à base de Ni

8.3.1.10 Avantages d'application et expansion du carbure cimenté à base de Ni

8.3.2 Introduction d' additifs Cr_3C_2 dans le carbure cimenté

8.3.2.1 Principe et aperçu technique de l'introduction d' additifs Cr_3C_2 dans le carbure cimenté

8.3.2.2 Analyse du mécanisme de résistance à l'oxydation et à la corrosion introduit par les additifs Cr_3C_2 dans le carbure cimenté

8.3.2.3 Analyse microscopique et vérification de l'introduction d' additifs Cr_3C_2 dans le carbure cimenté

8.3.2.4 Analyse des facteurs affectant les performances des additifs en carbure cimenté Cr_3C_2

8.3.2.5 Optimisation du procédé de préparation des additifs en carbure cimenté Cr_3C_2

8.3.2.6 Comparaison des performances et des cas d'ingénierie additive en carbure cimenté Cr_3C_2

8.3.2.7 Extension et limites d'application des additifs Cr_3C_2 dans le carbure cimenté

8.3.2.8 Orientation de l'optimisation et perspectives d'avenir de l'introduction d' additifs Cr_3C_2 dans le carbure cimenté

8.3.3 Protection de surface en alliage dur

Aperçu du principe et de la technologie de la protection de surface par revêtement en carbure cimenté

Analyse du mécanisme de résistance à la corrosion et à l'oxydation du revêtement de surface en carbure cimenté

Analyse microscopique et vérification du revêtement de surface en carbure cimenté

Analyse des facteurs affectant le revêtement de surface en carbure cimenté

8.3.3.6 Optimisation du processus de préparation de la protection de surface par revêtement en carbure cimenté

Études de cas et comparaison des performances des revêtements de surface en carbure cimenté

8.3.3.8 Extension et limites des applications des revêtements de surface en carbure cimenté

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

Orientation de l'optimisation et perspectives d'avenir de revêtement de surface en carbure cimenté

8.3.4 Optimisation des paramètres de procédé pour la résistance à la corrosion et la résistance aux hautes températures du carbure cimenté

8.3.4.1 Aperçu des principes et des technologies d'optimisation des paramètres de procédé pour la résistance à la corrosion et aux hautes températures du carbure cimenté

8.3.4.2 Analyse de la résistance à la corrosion et du mécanisme de performance de l'optimisation des paramètres du procédé de fabrication du carbure cimenté

8.3.4.3 Analyse microscopique et vérification de l'optimisation des paramètres de processus pour la résistance à la corrosion et la résistance à haute température du carbure cimenté

8.3.4.4 Analyse des facteurs affectant l'optimisation des paramètres de processus de résistance à la corrosion et de résistance aux hautes températures du carbure cimenté

8.3.4.5 Stratégie d'optimisation des paramètres de procédé pour la résistance à la corrosion et la résistance à haute température du carbure cimenté

8.3.4.6 Cas d'ingénierie et comparaison des performances de l'optimisation des paramètres de processus pour la résistance à la corrosion du carbure cimenté et la résistance aux hautes températures

8.3.4.7 Extension de l'application et limites de l'optimisation des paramètres de processus pour la résistance à la corrosion et la résistance aux hautes températures du carbure cimenté

8.3.4.8 Optimisation des paramètres de procédé pour la résistance à la corrosion et à haute température du carbure cimenté et perspectives d'avenir

8.3.5. Contrôle de la microstructure du carbure cimenté

8.3.5.1 Aperçu des principes et des technologies de contrôle de la microstructure du carbure cimenté

8.3.5.2 Analyse de la résistance à la corrosion et du mécanisme de performance de la régulation de la microstructure du carbure cimenté

8.3.5.3 Microanalyse et vérification du contrôle de la microstructure du carbure cimenté

8.3.5.4 Analyse des facteurs affectant la microstructure du carbure cimenté

8.3.5.5 Stratégie de contrôle de la microstructure du carbure cimenté

8.3.5.6 Cas d'ingénierie de contrôle de la microstructure du carbure cimenté et comparaison des performances

8.3.5.7 Extension et limites des applications du contrôle de la microstructure du carbure cimenté

8.3.5.8 Orientation et perspectives d'avenir du contrôle et de l'optimisation de la microstructure du carbure cimenté

8.4 Essais et évaluation de la résistance à la corrosion et à haute température du carbure cimenté

8.4.1 Taux de corrosion du carbure cimenté (courbe de Tafel électrochimique)

8.4.1.2 Mécanisme et analyse du taux de corrosion du carbure cimenté

8.4.1.3 Analyse des facteurs affectant la vitesse de corrosion du carbure cimenté

8.4.1.4 Méthode d'essai pour la vitesse de corrosion du carbure cimenté

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

8.4.1.6 Extension de l'application et limites du taux de corrosion du carbure cimenté
8.4.1.7 Orientation de l'optimisation et perspectives d'avenir du taux de corrosion du carbure cimenté
8.4.2 Essai de dureté à haute température et de choc thermique du carbure cimenté
Aperçu du principe et de la technologie des tests de dureté à haute température et de choc thermique du carbure cimenté
Mécanisme et analyse de l'essai de dureté à haute température et de choc thermique du carbure cimenté
8.4.2.3 Analyse des facteurs affectant la dureté à haute température et l'essai de choc thermique du carbure cimenté
Méthodes d'essai pour la dureté à haute température et le choc thermique du carbure cimenté
8.4.2.5 Application technique de l'essai de dureté à haute température et de choc thermique du carbure cimenté
Extension de l'application et limites de l'essai de dureté à haute température et de choc thermique du carbure cimenté
8.4.2.7 Orientation d'optimisation et perspectives d'avenir des essais de dureté à haute température et de choc thermique sur carbure cimenté
Références

appendice:

Analyse comparative des moules en carbure cimenté à haute température et des moules en alliage de tungstène à haute densité
Analyse comparative des moules haute température en carbure cimenté et des moules en alliage titane-zirconium-molybdène (TZM)
Présentation des composants des turbines à gaz en carbure cimenté
Outils de transformation des aliments en carbure et pièces d'équipement de transformation des aliments
Buse de turbine à gaz en carbure
Vanne de pipeline chimique en alliage dur
Pièces d'équipement de fabrication de papier en carbure
Norme nationale de la République populaire de Chine GB/T 7997-2017
Méthode d'essai de performance du carbure cimenté Norme nationale de la République populaire de Chine GB/T 3851-2015 Méthode de détermination de la microstructure du carbure cimenté Norme nationale de la République populaire de Chine GB/T 3850-2015 Méthode de détermination de la microstructure du carbure cimenté Norme nationale de la République populaire de Chine GB/T 18376-2014 Méthode d'essai de fatigue par impact du carbure cimenté Norme nationale de la République populaire de Chine GB/T 7997-2017 Méthode d'essai de performance du carbure cimenté
Norme internationale ISO 15156-1:2020
Industries pétrolière, pétrochimique et du gaz naturel — Matériaux destinés à être utilisés dans des environnements contenant du H₂S dans la production de pétrole et de gaz

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

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

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

— **Partie 1 : Principes généraux de sélection des matériaux résistants à la fissuration**Pétrole
, industries pétrochimiques et du gaz naturel — **Matériaux destinés à être utilisés dans des environnements contenant du H₂S dans la production de pétrole et de gaz** — **Partie 1 : Principes généraux de sélection des matériaux résistants à la fissuration**International
Norme ISO 15156-2:2020
Industries pétrolières, pétrochimiques et du gaz naturel
— **Matériaux destinés à être utilisés dans des environnements contenant du H₂S dans la production de pétrole et de gaz**
— **Partie 2 : Aciers au carbone et faiblement alliés résistants à la fissuration et utilisation des fontes**Pétrole
, industries pétrochimiques et du gaz naturel — **Matériaux destinés à être utilisés dans des environnements contenant du H₂S dans la production de pétrole et de gaz**
— **Partie 2 : Utilisation des aciers au carbone et faiblement alliés et des fontes résistantes à la fissuration**
Norme internationale ISO 15156-3:2020
Industries du pétrole, de la pétrochimie et du gaz naturel
— **Matériaux destinés à être utilisés dans des environnements contenant du H₂S dans la production de pétrole et de gaz**
— **Partie 3 : Alliages résistants à la fissuration (ARC) et autres alliages**Pétrole
, industries pétrochimiques et du gaz naturel — **Matériaux destinés à être utilisés dans des environnements contenant du H₂S dans la production de pétrole et de gaz**
— **Partie 3 : Alliages résistants à la corrosion (ARC) et autres alliages résistants à la fissuration**

Moule en carbure haute température

Coupe-papier en carbure CTIA GROUP

ISO 9227:2017 Essai de corrosion Essai au brouillard salin en atmosphère artificielle

Norme nationale de la République populaire de Chine GB/T 18376-2014

Méthodes d'essai pour la résistance à la corrosion et à l'usure du carbure cimenté

Norme internationale ISO 4287:1997

Spécifications géométriques des produits - Texture de surface : Méthode du profil - Termes, définitions et paramètres de texture de surface Spécifications géométriques des produits (GPS)

— **Texture de surface : méthode du profil**

— **Termes, définitions et paramètres de texture de surface**

Norme internationale ISO 3274:1996

Spécifications géométriques des produits — État de surface : Profilométrie —

Caractéristiques nominales des instruments de contact Spécifications géométriques des produits (GPS)

— **Texture de surface : méthode du profil**

— **Caractéristiques nominales des instruments de contact (stylet)**

ISO 4288:1996

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

Spécification géométrique des produits — État de surface : Méthode du profil — Règles et procédures pour l'évaluation de l'état de surface

— **Texture de surface : méthode du profil**

— **Règles et procédures pour l'évaluation de la texture de surface**

Norme nationale de la République populaire de Chine GB/T 12444-2006

Méthodes d'essai pour le frottement par glissement et l'usure des matériaux métalliques

Norme nationale de la République populaire de Chine GB/T 16545-2008 Méthodes d'essai pour la corrosion par brouillard salin des matériaux métalliques

Norme nationale de la République populaire de Chine GB/T 3850-2015

Lignes directrices générales pour les essais de corrosion des métaux et alliages Norme internationale ISO 8044:2015 Corrosion des métaux et alliages — Termes et définitions de base

Normes internationales ISO 9223:2012

Corrosion des métaux et alliages — Corrosivité des atmosphères — Classification

GB/T 38512015 Norme nationale de la République populaire de Chine

Méthode de détermination de la microstructure du carbure cimenté

Norme nationale de la République populaire de Chine GB/T 7997-2017 Méthode d'essai de performance du carbure cimenté Norme internationale ISO 6508 Matériaux métalliques —

Essai de dureté Rockwell Matériaux métalliques — Essai de dureté Rockwell

Norme internationale ISO 6508-3:2015

Matériaux métalliques — Essai de dureté Rockwell — Partie 3 : Étalonnage des blocs de référence

Norme internationale ISO 6508-1:2016

Matériaux métalliques — Essai de dureté Rockwell — Partie 1 : Méthode d'essai

Méthode d'essai standard ASTM G59 pour la réalisation de mesures de résistance de polarisation potentiodynamique

Méthode d'essai standard pour la détermination de la résistance de polarisation potentiodynamique

ASTM G3-14 Pratique standard

pour les conventions applicables aux mesures électrochimiques dans les essais de corrosion standard ASTM G5-14

pour la réalisation de mesures de polarisation anodique potentiodynamique

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