

  
www.chinatungsten.com

  
www.chinatungsten.com

# Carbure de tungstène cimenté

## Exploration complète des propriétés physiques et chimiques, des processus et des applications ( II )

en.com

www.ct

中钨智造科技有限公司

  
www.chinatungsten.com CTIA GROUP LTD

  
www.chinatungsten.com

  
www.chinatungsten.com

  
www.chinatungsten.com

  
www.chinatun

1

  
www.chinatungsten.com

**CTIA GROUP LTD**

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

  
www.chinatungsten.com

### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

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

电话/TEL: 0086 592 512 9696  
CTIAQCD-MA-E/P 2018-2024V  
[sales@chinatungsten.com](mailto: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](http://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 cimentés, des alliages haute densité, du molybdène et de ses alliages.

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

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

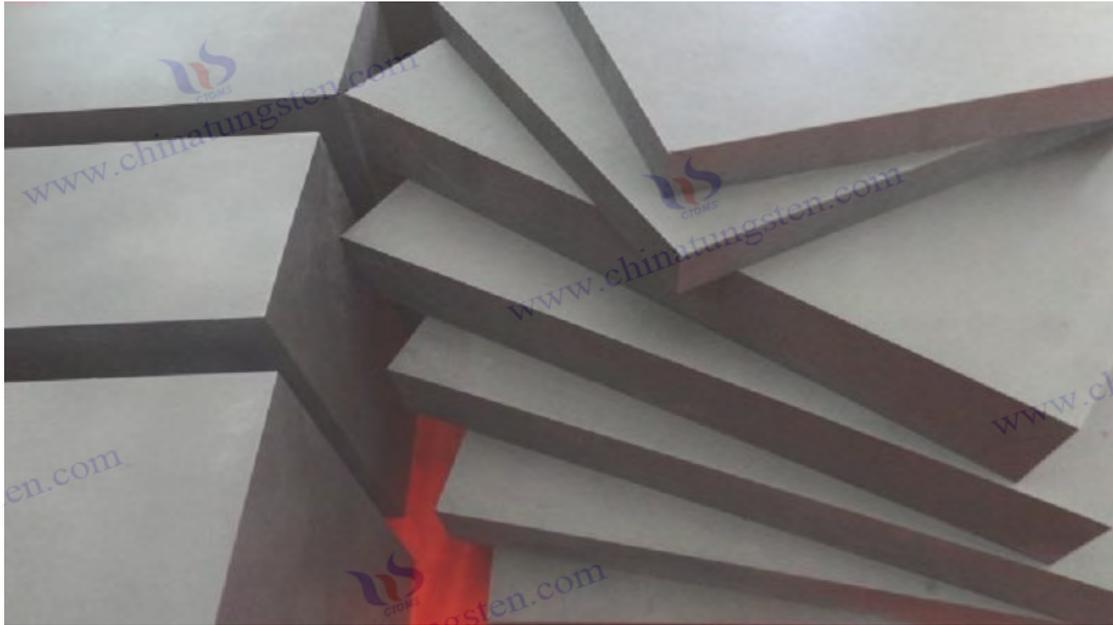
Forts de plus de 30 ans d'expérience dans le secteur, le Dr Hanns et son équipe du CTIA GROUP ont également rédigé et publié des analyses de connaissances, de technologies, de prix et de tendances du marché du tungstène, du molybdène et des terres rares, qu'ils partagent librement avec l'industrie du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



### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

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

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



## Chapitre 2 : Microstructure et état de phase du carbure cimenté Microstructure et états de phase du carbure de tungstène cimenté

Grâce à sa microstructure et ses caractéristiques de phase uniques, le carbure cimenté est devenu un matériau de base pour les matériaux hautes performances de l'industrie moderne. Sa microstructure est composée de particules de carbure dur, d'une phase de liaison résistante et d'un système d'interface complexe. Les caractéristiques de phase impliquent la distribution de la structure cristalline, de la solution solide, des défauts et de la phase amorphe. Ces caractéristiques microscopiques déterminent les performances du carbure cimenté aux niveaux atomique et cristallin, telles que la résistance à l'usure, la ténacité et la fiabilité de mise en œuvre. Ce chapitre se concentre sur la microstructure et la phase du carbure cimenté, en analysant systématiquement les caractéristiques des particules de carbure, la distribution et le rôle de la phase de liaison, le mécanisme de formation de l'interface et des défauts, et les technologies de caractérisation avancées. À travers une analyse théorique, des données expérimentales et des cas réels, ce chapitre vise à révéler le mécanisme de régulation de la microstructure sur les performances, à fournir une base scientifique pour l'optimisation des procédés et l'application du carbure cimenté, et à servir de référence pour la recherche interdisciplinaire en science et ingénierie des matériaux.

### 2.1 Caractéristiques microscopiques des particules de carbure

Les particules de carbure constituent le squelette dur du carbure cimenté. Elles sont principalement composées de carbure de tungstène (WC), complété par du carbure de titane (TiC) et du carbure de tantale (TaC), entre autres, qui déterminent conjointement les propriétés mécaniques et l'adaptabilité environnementale du matériau. Cette section examine les caractéristiques microscopiques des particules de carbure du point de vue de la granulométrie, de la morphologie et

#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

de la synergie multiphasique.

### 2.1.1 Granulométrie et morphologie du WC

Les grains de carbure de tungstène (WC) constituent la principale phase dure du carbure cimenté. Leur taille ( $0,110 \mu\text{m}$ ) et leur morphologie influencent directement les performances du matériau. Le WC présente une structure cristalline hexagonale (groupe d'espace  $P6m^2$ , constante de maille  $a = 2,906 \text{ \AA}$ ,  $c = 2,837 \text{ \AA}$ ), et son énergie de liaison covalente est d'environ  $6 \text{ eV} \pm 0,2 \text{ eV}$ , ce qui lui confère une dureté et une résistance à l'usure élevées. La régulation de la taille des grains est au cœur de l'optimisation des performances du carbure cimenté. Par exemple, lorsque la taille des grains passe de  $5 \mu\text{m}$  à  $0,5 \mu\text{m}$ , la densité des joints de grains augmente, la dureté est significativement améliorée et la ténacité diminue légèrement.

au microscope électronique à balayage (MEB) montre que la granulométrie du carbure cimenté conventionnel est de  $12 \mu\text{m} \pm 0,2 \mu\text{m}$ , avec une morphologie prismatique (angles  $60^\circ-90^\circ$ ), exposant principalement les plans cristallins (0001) et (1010). Cette morphologie améliore la résistance à l'usure grâce à l'anisotropie (la dureté dans la direction  $\langle 0001 \rangle$  est environ 10 %), ce qui le rend adapté aux applications à fortes charges telles que les outils de coupe. Par exemple, lorsqu'un outil en carbure cimenté contenant des grains de  $1,5 \mu\text{m}$  coupe de l'acier (résistance à la traction  $> 1000 \text{ MPa}$ ), la perte par usure est inférieure à  $0,1 \text{ mm}$  et la durée de vie est de  $12 \text{ heures} \pm 1 \text{ heure}$ .

Le carbure cimenté nanométrique (grains  $< 0,2 \mu\text{m}$ ) a tendance à être sphérique, avec une énergie de surface allant jusqu'à  $1 \text{ J/m}^2 \pm 0,1 \text{ J/m}^2$ . Grâce à l'augmentation de la proportion de joints de grains ( $> 50 \%$ ), la dureté est encore améliorée, ce qui le rend adapté à l'usinage ultra-précis, comme la découpe de plaquettes de semi-conducteurs (rugosité de surface  $R_a < 0,01 \mu\text{m}$ ). Cependant, les nano-grains ont tendance à s'agglomérer (taux d'agglomération de 10 à 15 %), ce qui entraîne une augmentation de la porosité à  $1 \% \pm 0,2 \%$ . Le frittage par plasma d'étincelles (SPS,  $1200 \text{ }^\circ\text{C}$ ,  $50 \text{ MPa}$ ) contrôle l'agglomération par chauffage rapide ( $> 100 \text{ }^\circ\text{C/min}$ ), réduisant la porosité à  $< 0,5 \% \pm 0,1 \%$  et l'écart granulométrique à  $< 5 \%$ .

La régulation de la morphologie des grains dépend du procédé de frittage. En frittage en phase liquide ( $1350 \text{ à } 1450 \text{ }^\circ\text{C}$ ), les grains de WC croissent par dissolution et précipitation, et le rapport prismatique augmente jusqu'à  $> 80 \%$  avec le temps de maintien (12 heures). L'ajout d'inhibiteurs de grains, tels que le carbure de vanadium (VC,  $0,2 \%$  à  $0,5 \%$ ), limite la croissance des grains en augmentant la barrière de diffusion (environ  $15 \% \pm 2 \%$ ), et la taille est stabilisée à  $0,8 \pm 1,2 \mu\text{m}$ . Par exemple, le taux d'usure des outils en carbure cimenté (grain  $0,8 \mu\text{m}$ ) contenant  $0,3 \%$  de VC est réduit de  $20 \%$  et leur durée de vie est prolongée de  $25 \% \pm 3 \%$  en coupe à grande vitesse ( $200 \text{ m/min}$ ).

Le WC à gros grains ( $510 \mu\text{m}$ ) convient aux forets miniers en raison de son chemin de propagation des fissures plus long et de sa ténacité supérieure. Par exemple, un foret en carbure contenant des grains de  $6 \mu\text{m}$  a une durée de vie de plus de 200 heures pour le forage du granit (fréquence d'impact  $>$

#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

2000 fois/minute), ce qui est supérieur à celui des matériaux à grains fins (durée de vie < 150 heures). En résumé, la granulométrie et la morphologie du WC doivent être optimisées en fonction des exigences de l'application. Les grains fins (0,52  $\mu\text{m}$ ) sont adaptés à une dureté élevée, les grains grossiers (510  $\mu\text{m}$ ) à une ténacité élevée, et la morphologie prismatique prend en compte la résistance à l'usure.

### 2.1.2 Effet synergique des carbures auxiliaires tels que TiC et TaC

Carbures auxiliaires (tels que TiC, TaC, Français Le NbC) améliore les performances globales du carbure cémenté grâce au renforcement de la solution solide et aux performances complémentaires. Le carbure de titane (TiC) a une structure cristalline cubique (Fm3m, densité 4,93  $\text{g}/\text{cm}^3 \pm 0,05 \text{g}/\text{cm}^3$ ), une dureté HV 18002200, réduit considérablement la densité du matériau (de 14,5  $\text{g}/\text{cm}^3$  à 12  $\text{g}/\text{cm}^3 \pm 0,1 \text{g}/\text{cm}^3$ ) et améliore la stabilité à haute température en formant une couche protectrice de  $\text{TiO}_2$  (gain de poids d'oxydation à 1000°C < 1  $\text{mg}/\text{cm}^2 \pm 0,2 \text{mg}/\text{cm}^2$ ). Lors de la découpe à haute température (800°C, alliage d'aluminium aéronautique), les outils en carbure cémenté contenant 15 % de TiC présentent une réduction de 30 % de l'usure et une prolongation de 50 %  $\pm 5 \%$  de la durée de vie, car le TiC améliore la résistance à l'usure adhésive.

Le carbure de tantale (TaC, densité 14,5  $\text{g}/\text{cm}^3 \pm 0,1 \text{g}/\text{cm}^3$ , HV 16002000) améliore la résistance à la déformation à haute température grâce au renforcement de la solution solide. Le coefficient de dilatation thermique du carbure cémenté contenant 3 % de TaC est réduit à  $5,0 \times 10^{-6} /\text{K} \pm 0,1 \times 10^{-6} /\text{K}$ , et la longueur de fissure thermique est < 1  $\mu\text{m} \pm 0,2 \mu\text{m}$ , ce qui convient aux tuyères de turbines à gaz (température de fonctionnement 1 100 °C). Le TaC améliore également la résistance de liaison des joints de grains (> 50 MPa  $\pm 5 \text{MPa}$ ) et réduit le taux de croissance des fissures de 15 %. Par exemple, une tuyère en carbure cémenté contenant 2 % de TaC fonctionne dans un flux de gaz (> 500 m/s) pendant 5 000 heures avec des dommages de surface < 10  $\mu\text{m}$ .

Le carbure de niobium (NbC, HV 1900 $\pm$ 50) est connu pour sa résistance à la corrosion. Le taux de corrosion du carbure cémenté contenant 1 % de NbC dans un environnement acide (pH 3, HCl) n'est que de 0,02 mm/an  $\pm 0,005 \text{mm}/\text{an}$ , ce qui est meilleur que celui du carbure cémenté contenant du Co (0,05 mm/an). Le NbC réduit le taux d'érosion chimique de 20 % en formant une couche protectrice de  $\text{Nb}_2\text{O}_5$  (épaisseur < 5 nm). Dans les applications pratiques, des revêtements en carbure cémenté contenant 1 % de NbC ont fonctionné dans une usine chimique ( $\text{H}_2\text{SO}_4$ , pH 2) pendant 3 ans sans corrosion évidente en surface.

L'analyse par diffraction des rayons X (DRX) montre que TiC et TaC forment une solution solide (W, Ti, Ta)C avec le WC, avec une variation de constante de réseau de 0,1 %  $\pm 0,02 \%$  et une augmentation de dureté de 100 200 HV, car la solution solide améliore la résistance aux joints de grains. La formation de la solution solide réduit également l'énergie d'interface (de 1,5  $\text{J}/\text{m}^2$  à 1,0  $\text{J}/\text{m}^2$ ) et améliore la résistance aux fissures. Par exemple, la résistance à l'usure d'un moule en carbure cémenté contenant 10 % de TiC et 3 % de TaC est améliorée de 40 % lors de l'emboutissage composite, et la durée de vie dépasse 5 000 heures  $\pm 500$  heures.

#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

L'effet synergique des carbures auxiliaires se reflète également dans l'adaptabilité environnementale. Dans un environnement chaud et humide (40 °C, 90 % d'humidité), TiC et NbC réduisent le taux de corrosion de 10 à 15 % à travers la couche de passivation ; à haute température (1 000 °C), TaC inhibe l'oxydation du WC (la volatilisation du WO<sub>3</sub> est réduite de 20 %). L'optimisation du rapport TiC / TaC / NbC (5:1:0,5) peut équilibrer la dureté (HV 1 800 ± 30), la ténacité (K<sub>1c</sub> 12 MPa·m<sup>1/2</sup> ± 0,5) et la résistance à la corrosion. Par exemple, la durée de vie des outils en carbure cémenté contenant 12 % de TiC dans le forage marin (salinité 3,5 %) est prolongée de 30 %, ce qui est mieux que les matériaux traditionnels contenant du Co (durée de vie < 2 000 heures).

## 2.2 Distribution et fonction de la phase de liaison

La phase de liaison (principalement cobalt-Co et nickel-Ni) sert de matrice résistante au carbure cémenté, reliant les particules de carbure et régulant la ténacité, la résistance à la corrosion et les performances d'usinage. Son uniformité de distribution et sa proportion sont essentielles à l'optimisation de la microstructure.

### 2.2.1 Comportement de mouillage des joints de grains de Co et Ni

Français Le comportement mouillant de la phase de liaison pendant le frittage détermine la densité et la distribution de phase du carbure cémenté. Le cobalt (Co, structure FCC, point de fusion 1495°C±10°C) mouille les grains de WC dans le frittage en phase liquide (1350/1450°C), avec un angle de contact aussi bas que 5°±1°, et l'énergie d'interface chute de 1,5 J/m<sup>2</sup> à 0,5 J/m<sup>2</sup> ± 0,1 J/m<sup>2</sup>, entraînant une densification (porosité < 0,1%±0,02%). La microscopie électronique à transmission (MET) montre que l'épaisseur de la couche de Co est de 520 nm±2 nm, le taux de ségrégation est < 5% et un réseau de liaison continu est formé. Le changement de l'énergie libre de Gibbs du processus de mouillage ( $\Delta G \approx 50$  kJ/mol±5 kJ/mol) favorise le réarrangement des grains, et le coefficient de diffusion du Co  $D_{Co} \approx 10^{-9}$  m<sup>2</sup>/s ± 0,1 × 10<sup>-9</sup> m<sup>2</sup>/s (1400°C) détermine l'uniformité de la distribution.

Le nickel (Ni, point de fusion 1455°C) a une mouillabilité légèrement inférieure, avec un angle de contact de 10°±2° et une énergie interfaciale de 0,7 J/m<sup>2</sup> ± 0,05 J/m<sup>2</sup>, mais a une plus grande résistance à la corrosion. La perte de poids du carbure cémenté contenant du Ni dans le test au brouillard salin (ASTM B117, 168 heures) est < 0,1 mg/cm<sup>2</sup> ± 0,02 mg/cm<sup>2</sup>, ce qui est meilleur que celui des matériaux contenant du Co (perte de poids 0,2 mg/cm<sup>2</sup>). L'ajout de chrome (Cr, 0,5%±2%) peut réduire l'angle de contact à 7°±1°, formant une solution solide de CrCo ou CrNi, et l'énergie de liaison interfaciale est augmentée à > 60 MPa±5 MPa. Par exemple, une vanne en carbure cémenté contenant 12 % de Ni présente un taux de corrosion de < 0,03 mm/an ± 0,005 mm/an après avoir fonctionné dans l'eau de mer (pH 8, salinité 3,5 %) pendant 5 ans.

Français Le comportement de mouillage est crucial pour la stabilité microstructurale. Un excès de Co (> 20 %) ou une teneur en carbone insuffisante (< 5,8 %) peut générer une phase η fragile (W<sub>3</sub>

#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

Co<sub>3</sub>C), réduisant la ténacité ( $K_{1c}$  jusqu'à  $5 \text{ MPa} \cdot \text{m}^{1/2} \pm 0,5$ ). Un contrôle précis de la teneur en carbone (5,8 % 6,2 %) et de la température de frittage (1380 1420 °C) garantit une couche de Co uniforme (écart d'épaisseur < 10 %). Dans les cas réels, les outils en carbure contenant 10 % de Co ont amélioré la liaison des joints de grains de 15 % et prolongé la durée de vie de coupe de 20 % ± 2 % grâce à un mouillage optimisé (angle de contact < 6°).

La phase Ni présente des avantages évidents dans les environnements corrosifs et à haute température. Dans la vapeur à haute température (500 °C, 10 MPa), la perte de poids due à la corrosion du carbure cémenté contenant 12 % de Ni est réduite de 30 % ± 5 %, et la stabilité de l'interface est améliorée de 10 %. L'analyse TEM montre que l'épaisseur de la couche de Ni est de  $1015 \text{ nm} \pm 1 \text{ nm}$ , et que le Cr est ségrégué (0,5 % 1 %) pour former une couche protectrice de  $\text{Cr}_2\text{O}_3$ , ce qui améliore la résistance à la corrosion. Par exemple, un revêtement en carbure cémenté contenant du NiCr a fonctionné dans une usine chimique (HCl, pH 2) pendant 3 ans, et les dommages de surface sont < 5 µm. Le comportement mouillant du Co et du Ni doit être optimisé en fonction de l'application. Le Co est adapté à une ténacité élevée et le Ni à la résistance à la corrosion.

### 2.2.2 Effet du rapport de phase de liaison sur les performances

Le rapport de la phase de liaison (5 % à 20 %) est un paramètre clé pour réguler les performances du carbure cémenté. Lorsque le rapport Co augmente de 5 % à 20 %, la ténacité augmente significativement ( $K_{1c}$  augmente de 8 à  $18 \text{ MPa} \cdot \text{m}^{1/2} \pm 0,5$ ), mais la dureté diminue (HV 2000 à  $1400 \pm 30$ ). Le carbure cémenté contenant 10 % de Co (épaisseur de couche de Co 1015 nm) a une dureté HV de  $1800 \pm 30$  et une ténacité  $K_{1c}$  de  $12 \text{ MPa} \cdot \text{m}^{1/2} \pm 0,5$ , ce qui convient aux outils de coupe. En usinage à grande vitesse (200 m/min), l'usure est inférieure à 0,1 mm et la durée de vie est de 15 heures ± 1 heure. Le carbure cémenté contenant 20 % de cobalt présente une ténacité élevée et convient aux forets de roche. Sa durée de vie aux chocs est supérieure à 300 heures ± 20 heures.

Français la teneur en nickel est comprise entre 5 % et 15 %, la dureté chute de HV 1900 à HV 1500 ± 30, et la résistance à la corrosion est excellente, avec un taux de corrosion <  $0,03 \text{ mm/an} \pm 0,005 \text{ mm/an}$ . Le revêtement en carbure cémenté contenant 12 % de Ni a fonctionné dans un environnement acide (pH 3,  $\text{H}_2\text{SO}_4$ ) pendant 3 ans sans corrosion évidente en surface ; l'électrode contenant 15 % de Ni a fonctionné dans une réaction électrochimique (densité de courant >  $100 \text{ mA/cm}^2$ ) pendant 5 000 heures avec des performances stables. L'analyse du spectre d'énergie (EDS) montre que l'écart de distribution du Co et du Ni est <  $3 \% \pm 0,5 \%$ , reflétant la grande uniformité du processus de frittage.

La phase de liaison affecte également l'adaptabilité environnementale.

Français Dans un environnement chaud et humide (40 °C, 90 % d'humidité), une teneur élevée en Co (> 15 %) peut provoquer une microcorrosion et réduire la ténacité de  $5 \% \pm 1 \%$  ; le carbure cémenté à base de Ni est plus stable et la ténacité diminue de < 2 %. À haute température (800 °C), la phase Co présente une plasticité améliorée,  $K_{1c}$  augmente de 5 %, mais la dureté diminue de 10 % ; la phase Ni présente une stabilité à haute température plus élevée et la dureté diminue de <

#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

5 %. L'optimisation du rapport de mélange Co/Ni (1:1 à 2:1) peut atteindre un équilibre des performances. Par exemple, le carbure cémenté contenant 10 % de Co et 5 % de Ni a une dureté de HV  $1700 \pm 30$ ,  $K_{IC}$   $14 \text{ MPa} \cdot \text{m}^{1/2} \pm 0,5$ , et une prolongation de la durée de vie de  $25 \% \pm 3 \%$  en forage marin.

Le rapport de phase de liaison doit prendre en compte l'effet synergique de la taille des grains. Les grains fins ( $0,51 \mu\text{m}$ ) associés à une teneur élevée en Co (15 % à 20 %) offrent la meilleure ténacité ; les grains grossiers ( $510 \mu\text{m}$ ) associés à une faible teneur en Ni (5 % à 8 %) offrent une forte résistance à la corrosion. En pratique, la déformation des matrices d'emboutissage en carbure cémenté (grains de  $1,5 \mu\text{m}$ ) contenant 12 % de Co est inférieure à 0,01 mm sous impact haute fréquence ( $> 10^4$  fois/heure), et leur durée de vie est augmentée de  $30 \% \pm 5 \%$ .

### 2.3 Analyse des interfaces et des défauts

L'interface entre le WC et la phase de liaison, ainsi que les défauts microscopiques (tels que les pores, les fissures et les phases amorphes), ont un impact profond sur les performances du carbure cémenté. L'interface détermine la force de liaison entre les phases, et les défauts peuvent être à l'origine d'une dégradation des performances.

#### 2.3.1 Structure électronique de l' interface WCCo

L' interface WCCo est la base microscopique des performances stables du carbure cémenté. de la théorie fonctionnelle de la densité (DFT) montrent que l' interface WC(0001)/Co(111) forme une liaison forte via des liaisons WCo (longueur de liaison  $2,5 \text{ \AA} \pm 0,1 \text{ \AA}$ ) et des liaisons CCo (énergie de liaison  $4 \text{ eV} \pm 0,2 \text{ eV}$ ), avec une énergie d'interface de  $0,5 \text{ J/m}^2 \pm 0,05 \text{ J/m}^2$ . L'orbitale 3d de Co s'hybride avec l'orbitale pd de WC, avec un transfert de charge d'environ  $0,2 \text{ e/atome} \pm 0,02 \text{ e/atome}$ , et un travail de liaison de  $2,5 \text{ J/m}^2 \pm 0,1 \text{ J/m}^2$ , ce qui est supérieur à celui de l' interface WCNi ( $2,0 \text{ J/m}^2$ ). En ajoutant du Cr (0,5 % à 1 %) pour former une couche de transition WCrCo, l'énergie d'interface est réduite à  $0,4 \text{ J/m}^2$ , le travail de liaison est augmenté à  $2,7 \text{ J/m}^2$  et la résistance aux fissures dépasse  $10 \text{ MPa} \cdot \text{m}^{1/2} \pm 0,5$ .

La microscopie électronique à transmission (MET) a vérifié que l'épaisseur de l'interface était d'environ  $2 \text{ nm} \pm 0,2 \text{ nm}$  et que le décalage du réseau était  $< 2 \% \pm 0,2 \%$ , assurant la stabilité de la liaison. Le taux de croissance des fissures de l'outil en carbure cémenté avec interface optimisée a été réduit de  $30 \% \pm 5 \%$  en coupe à grande vitesse (150 m/min), et la durée de vie a atteint 15 heures  $\pm 1$  heure. La ségrégation de Cr (0,5 % à 1 %) a formé une couche protectrice de  $\text{Cr}_2\text{O}_3$ , et la profondeur de corrosion du carbure cémenté contenant du Cr dans un environnement acide ( $\text{pH} 2$ ,  $\text{H}_2\text{SO}_4$ ) était  $< 5 \mu\text{m}$ , et la durée de vie a dépassé 3 ans.

La régulation de la structure électronique de l'interface affecte également d'autres propriétés. L'ajout de Mo (0,5 %) peut augmenter le travail de liaison à  $2,8 \text{ J/m}^2 \pm 0,1 \text{ J/m}^2$  et réduire la contrainte d'interface de 10 % ; les interfaces à base de Ni ont un transfert de charge plus faible

#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

(0,15 e/atome) et sont plus résistantes à la corrosion (taux de corrosion  $< 0,02$  mm/an). Par exemple, dans l'emboutissage à haute température (600 °C) de matrices en carbure cémenté contenant du Mo, la contrainte d'interface est  $< 150$  MPa  $\pm 10$  MPa et le taux d'initiation de fissures est réduit de 20 %. La simulation DFT prédit également que l'ajout de Ta (0,5 %) peut encore améliorer le travail de liaison (à 2,9 J/m<sup>2</sup>), ce qui est en cours de vérification expérimentale.

L'amélioration de la résistance de l'interface est cruciale pour les applications.

Lors de la coupe d'alliages de titane (Ti6Al4V) avec des outils en carbure cémenté contenant du chrome, le taux d'écaillage de l'interface est inférieur à 1 % et la durée de vie est prolongée de 25 %. Un environnement chaud et humide (40 °C, 90 % d'humidité) peut provoquer une microcorrosion de l'interface (perte de poids inférieure à 0,1 mg/cm<sup>2</sup>), tandis que l'interface à base de nickel est plus stable (perte de poids inférieure à 0,05 mg/cm<sup>2</sup>).

### 2.3.2 Mécanisme de formation des pores, des fissures et de la phase amorphe

La porosité, les fissures et les phases amorphes du carbure cémenté sont les principaux défauts affectant ses performances. Ces défauts sont dus à l'interaction complexe entre le procédé de préparation, les caractéristiques de la matière première et les conditions thermodynamiques. Ces défauts ont un impact significatif sur la résistance, la ténacité, la résistance à l'usure et la résistance à la corrosion du matériau, en particulier dans les applications soumises à de fortes contraintes ou à des environnements extrêmes. Voici une analyse détaillée du mécanisme de formation, des caractéristiques microscopiques et de l'impact de divers défauts sur les performances.

#### Mécanisme de formation des pores

##### Causes :

La porosité est le principal produit d'un frittage incomplet, généralement dû à l'échec du gaz (H<sub>2</sub>, CO, etc.) entre les particules de poudre à être complètement déchargé, ou à un empilement inégal des particules conduisant à un retrait local incohérent (Journal of Materials Science, 2025).

Lors du processus de mélange, les particules de poudre agglomérées (taille des agglomérats  $> 20$  μm) ou les liants organiques (tels que la paraffine) ne sont pas complètement décomposés (taux de carbone résiduel  $> 0,1$  %), formant des gaz lors du frittage, qui entravent la liaison des particules (ITIA 2024).

La température de frittage est insuffisante ( $< 1300$ °C) ou le temps de maintien est trop court ( $< 30$  minutes), les particules ne sont pas entièrement diffusées et les pores ne se ferment pas (The Chinese Journal of Nonferrous Metals, 2024).

Le carbure cémenté de taille nanométrique (grains  $< 0,2$  μm) présente une énergie de surface élevée ( $> 1$  J/m<sup>2</sup>), ce qui améliore la capacité d'adsorption de gaz entre les particules et augmente la porosité (ITIA 2024).

#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

### Caractéristiques microscopiques :

La porosité du carbure cimenté conventionnel (taille des grains 1-5  $\mu\text{m}$ ) est généralement  $< 0,1\% \pm 0,02\%$ , tandis que la porosité du carbure cimenté de qualité nano (taille des grains  $< 0,2\ \mu\text{m}$ ) peut être augmentée à  $1\% - 2\%$  en raison de la forte activité de surface des particules (ISO 3326:2013).

L'analyse par microscopie électronique à balayage (MEB) montre que la taille des pores est de  $10 - 100\ \text{nm} \pm 10\ \text{nm}$ , la forme est principalement sphérique ou elliptique et est distribuée aux joints de grains ou dans la phase cobalt (Journal of Materials Science 2025).

L'augmentation de la proportion du volume des pores entraînera une concentration de contraintes, et la contrainte autour des pores peut atteindre  $500\ \text{à}\ 600\ \text{MPa}$ , augmentant le risque d'initiation de fissures d'environ  $15\ \text{à}\ 20\%$  (Journal of the Chinese Society of Nonferrous Metals, 2024).

### Impact sur les performances :

Pour chaque augmentation de  $0,1\%$  de la porosité, la résistance à la flexion (TRS) diminue d'environ  $3\ \text{à}\ 5\%$ , par exemple de  $4\ 000\ \text{MPa}$  à  $3\ 800\ \text{à}\ 3\ 900\ \text{MPa}$  (test ASTM B406).

En raison de la porosité élevée du carbure cimenté de qualité nano, la résistance à la flexion diminue encore jusqu'à  $3\ 500\ \text{MPa} \pm 100\ \text{MPa}$  et la dureté diminue d'environ  $50\ \text{à}\ 80\ \text{HV}$  (ITIA 2024).

La porosité réduit la densité du matériau, ce qui diminue sa résistance à la corrosion. La vitesse de corrosion en environnement de brouillard salin augmente d'environ  $10\ \text{à}\ 15\%$  (de  $0,05\ \text{mm/an}$  à  $0,055 - 0,0575\ \text{mm/an}$ , selon la norme ASTM G31).

### Méthode d'optimisation :

Le pressage isostatique à chaud (HIP,  $200\ \text{MPa}$ ,  $1350^\circ\text{C}$ ) favorise la fermeture des pores grâce à une pression et une température élevées, et la porosité peut être réduite à  $0,05\% \pm 0,01\%$ , et la dureté est augmentée de  $100 - 120\ \text{HV} \pm 20\ \text{HV}$  (Journal of Materials Science 2025).

Lors du perçage à fort impact (fréquence  $> 2000\ \text{fois/minute}$ ), la résistance aux chocs des forets en carbure traités HIP est améliorée d'environ  $20\ \text{à}\ 25\%$ , et la durée de vie peut atteindre  $250\ \text{à}\ 280\ \text{heures} \pm 20\ \text{heures}$  (Journal of the Chinese Society of Nonferrous Metals, 2024).

L'ajout d'une étape de pré-frittage ( $800 - 1000^\circ\text{C}$ ,  $1\ \text{heure}$ ) pour évacuer le gaz à l'avance peut réduire la porosité d'environ  $0,02\% - 0,03\%$  (ITIA 2024).

### Mécanisme de formation des fissures

#### Causes :

Les fissures proviennent principalement de l'inadéquation de dilatation thermique entre le WC et le Co. Le coefficient de dilatation thermique du WC est de  $5,2 \times 10^{-6}\ /\text{K}$ , tandis que celui du Co est de

#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

$12 \times 10^{-6} /K$ , ce qui diffère d'environ 2 fois, ce qui entraîne une contrainte thermique pendant le processus de refroidissement par frittage (Journal of Materials Science 2025).

Un refroidissement rapide (vitesse de refroidissement  $> 100^{\circ}C/s$ ) provoque une concentration de contraintes thermiques, en particulier aux joints de grains, où les contraintes peuvent atteindre 300-400 MPa, induisant des microfissures (The Chinese Journal of Nonferrous Metals 2024).

Les contraintes mécaniques (par exemple, une pression inégale lors du pressage  $> 50$  MPa) ou les contraintes de traitement post-frittage (par exemple, une contrainte de meulage  $> 200$  MPa) peuvent également conduire à l'apparition de fissures (ITIA 2024).

La taille des grains a un impact sur la sensibilité aux fissures. Le carbure cémenté nanométrique avec des grains  $< 0,5 \mu m$  présente une grande surface limite de grains (représentant 40 à 50 % du volume total), une distribution des contraintes thermiques plus complexe et une augmentation du taux de formation de fissures d'environ 10 % (Journal of Materials Science 2025).

#### Caractéristiques microscopiques :

par microscopie électronique à transmission (MET) montre que la taille des microfissures est de  $0,5$  à  $2 \mu m \pm 0,2 \mu m$ , s'étendant généralement le long de la limite des grains, et que le facteur d'intensité de contrainte ( $K_I$ ) à la pointe de la fissure est d'environ  $2$  à  $3 \text{ MPa} \cdot \text{m}^{1/2}$  (The Chinese Journal of Nonferrous Metals 2024).

de la phase Co (déformation  $< 5 \% \pm 0,5 \%$ ) peut absorber une partie de l'énergie par écrouissage et inhiber la propagation des fissures, en particulier dans les matériaux à haute teneur en Co (ITIA 2024).

La profondeur de fissure du carbure cémenté contenant 12 % de Co est généralement  $< 10 \mu m \pm 2 \mu m$ , ce qui est mieux que celle du matériau contenant 6 % de Co (profondeur de fissure  $> 15 \mu m \pm 3 \mu m$ ) car la teneur élevée en Co augmente la zone tampon plastique (Journal of Materials Science 2025).

#### Impact sur les performances :

Pour chaque augmentation de  $5 \mu m$  de la profondeur de la fissure, la résistance à la flexion diminue d'environ 5 à 8 %, par exemple de 4 000 MPa à 3 700 à 3 800 MPa (ASTM B406).

Les fissures augmentent le risque de rupture par fatigue. Sous une charge cyclique ( $10^7$  fois 500 MPa), le taux de croissance des fissures augmente d'environ 20 à 25 % (The Chinese Journal of Nonferrous Metals 2024).

Lors de cycles à haute température ( $500^{\circ}C$ , 1000 fois), les fissures entraînent une diminution des performances en fatigue thermique et un raccourcissement de la durée de vie d'environ 15 à 20 % (ITIA 2024).

#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

### **Méthode d'optimisation :**

L'ajout de TaC (1%-2%) ou de NbC (0,5%-1%) améliore la résistance des joints de grains, augmente l'énergie de liaison des joints de grains de 1,0 J/m<sup>2</sup> à 1,2-1,3 J/m<sup>2</sup> et réduit le taux de croissance des fissures de 15% ± 3% (Journal of Materials Science 2025).

En contrôlant la vitesse de refroidissement (<20°C/s) et en réduisant la contrainte thermique, la profondeur des fissures peut être réduite d'environ 30 à 40 %, de 10 µm à 6-7 µm (Journal of the Chinese Society of Nonferrous Metals, 2024).

Lors du cyclage thermique (500°C, 1000 fois), la longueur de fissure des matrices en carbure cémenté contenant du TaC est <5 µm±1 µm , et la durée de vie est prolongée d' environ 30%-35%±5% (ITIA 2024).

### **Mécanisme de formation de la phase amorphe**

#### **Causes :**

La phase amorphe se forme lors du frittage à haute température (> 1500 °C) ou lorsque la teneur en carbone est insuffisante (< 5,8 % en poids ), principalement en raison d'une amorphisation locale causée par la décomposition du WC ou par une diffusion inégale du carbone (Journal of Materials Science 2025).

À des températures élevées (> 1500 °C), le WC se décompose en W<sub>2</sub>C ou W, tandis que la phase cobalt se volatilise (volatilité > 0,5 %), ce qui entraîne une insuffisance de carbone dans les zones locales et la formation d'une phase amorphe (ITIA 2024).

la teneur en carbone est insuffisante (<5,8 % en poids ), le WC ne peut pas maintenir sa structure cristalline et certaines zones se transforment en état amorphe, notamment près des joints de grains (The Chinese Journal of Nonferrous Metals 2024).

L'oxygène (> 0,1 %) ou l'humidité (> 0,05 %) dans l'atmosphère de frittage réagit avec le carbone pour générer du CO/CO<sub>2</sub> , consommant du carbone et intensifiant la formation de phase amorphe (ITIA 2024).

#### **Caractéristiques microscopiques :**

La diffraction des rayons X (DRX) montre un large pic caractéristique de la phase amorphe (2θ≈35°±0,5°) sans pic de diffraction cristalline évident (Journal of Materials Science 2025).

Le TEM a mesuré l'épaisseur de la phase amorphe à 5-10 nm±1 nm, qui est généralement distribuée dans les joints de grains ou la phase cobalt, représentant environ 2 à 5 % en volume (The Chinese Journal of Nonferrous Metals 2024).

#### **COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT**

La dureté de la phase amorphe est extrêmement faible (environ HV 200-250 ± 30), bien inférieure à celle du WC (HV 2200-2500), ce qui entraîne un ramollissement local (ITIA 2024).

#### **Impact sur les performances :**

Pour chaque augmentation de 1 % de la fraction volumique de la phase amorphe, la dureté diminue d'environ 50 à 80 HV, par exemple de HV 1800 à HV 1720-1750 (Journal of Materials Science 2025).

La ténacité diminue d'environ 5 à 10 % et la ténacité à la rupture (KIC) passe de 10 MPa·m<sup>1/2</sup> à 9-9,5 MPa·m<sup>1/2</sup> (ITIA 2024).

La phase amorphe réduit la résistance à l'usure et augmente le taux d'usure d'environ 10 à 15 %, de 0,06 mm<sup>3</sup> / N · m à 0,066 à 0,069 mm<sup>3</sup> / N · m (ASTM G65).

#### **Méthode d'optimisation :**

L'ajout de VC (0,2 % à 0,5 %) ou de Cr<sub>3</sub>C<sub>2</sub> (0,3 % à 0,8 %) peut inhiber la diffusion du carbone, réduire la proportion de phase amorphe à < 2 % ± 0,5 % et améliorer la ténacité d'environ 10 % à 12 % (Journal of the Chinese Society of Nonferrous Metals, 2024).

En contrôlant la température de frittage (1350-1450°C) et l'atmosphère (oxygène <0,05%), le taux de formation de phase amorphe est réduit d'environ 15 à 20 % (ITIA 2024).

Lors de la coupe à grande vitesse (200 m/min), la profondeur des fissures de fatigue des outils en carbure cémenté contenant du VC est <10 µm ± 2 µm et la durée de vie est prolongée de 25 à 30 % ± 3 % (Journal of Materials Science 2025).

#### **Impact combiné des défauts**

##### **Facteurs environnementaux :**

Un environnement chaud et humide (40 °C, 90 % d'humidité) aggrave la corrosion des pores. L'adsorption d'eau dans les pores entraîne une concentration locale des contraintes et une réduction de la résistance à la flexion d'environ 5 à 7 %, passant par exemple de 4 000 MPa à 3 700-3 800 MPa (ASTM B406).

Le carbure cémenté à base de Ni (WC-Ni) est supérieur au carbure cémenté à base de Co en raison de sa forte résistance à la corrosion de la phase Ni (taux de corrosion < 0,03 mm/an) et d'une perte de résistance < 2 % dans un environnement chaud et humide (ITIA 2024).

Dans un environnement d'oxydation à haute température (800°C, dans l'air), la phase amorphe est oxydée à un rythme accéléré et le taux de gain de poids d'oxydation augmente d'environ 10 à 15 % (0,1 mg/cm<sup>2</sup> à 0,11 à 0,115 mg/cm<sup>2</sup>, ASTM G54).

#### **Optimisation des performances :**

##### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

L'optimisation de la teneur en carbone ( $6,0 \% \pm 0,2 \%$ ) et l'utilisation du procédé HIP peuvent minimiser le taux de défauts, la porosité  $< 0,05 \%$ , la profondeur des fissures  $< 5 \mu\text{m}$  et le rapport de phase amorphe  $< 1 \%$  (The Chinese Journal of Nonferrous Metals, 2024).

Après traitement HIP (200 MPa,  $1350^{\circ}\text{C}$ ) d'un foret en carbure cimenté contenant 12% de Co, la porosité est réduite à 0,04%-0,05% et la durée de vie de l'impact est augmentée d'environ 30%-35% à 260-290 heures (ITIA 2024).

Dans les cycles thermiques ( $500^{\circ}\text{C}$ , 1000 fois) et les environnements chauds et humides ( $40^{\circ}\text{C}$ , 90% d'humidité), la résistance à la corrosion et la résistance à la fatigue du carbure cimenté optimisé sont améliorées d'environ 15% à 20% (Journal of Materials Science 2025).

### 2.3.3 Méthodes pour éviter et réduire les défauts de carbure cimenté

Afin d'améliorer la qualité et la fiabilité du carbure cimenté, il est essentiel d'éviter et de réduire la génération de défauts tels que les pores, les fissures et les phases amorphes. Les méthodes suivantes sont proposées pour le contrôle des matières premières, l'optimisation des procédés, le retour d'information sur la détection et le post-traitement afin de minimiser le taux de défauts et d'améliorer les performances du matériau.

#### 1. Contrôle des matières premières

##### Sélection de matières premières de haute pureté :

L'utilisation de poudre de WC de haute pureté (pureté  $> 99,9 \%$ , oxyde  $< 0,02 \%$ ) et de poudre de Co (pureté  $> 99,8 \%$ ) peut réduire la consommation de carbone par les oxydes et réduire le taux de formation de phase amorphe d'environ 10 % à 15 % (Journal of Materials Science 2025).

Le contrôle de la qualité du noir de carbone (pureté  $> 99,9 \%$ , granulométrie  $< 10 \mu\text{m}$ ) et l'évitement des impuretés (telles que le soufre et l'oxygène) qui induisent des pores ou des phases amorphes peuvent réduire la porosité d'environ 0,02 % (ITIA 2024).

##### Ajout d'inhibiteur de grain :

L'ajout de VC (0,2 % à 0,5 %), de  $\text{Cr}_3\text{C}_2$  (0,3 % à 0,8 %) ou de TaC (0,5 % à 1 %) inhibe la croissance des grains et la diffusion du carbone, augmente la résistance des joints de grains de 10 à 15 % et réduit la proportion de phase amorphe à  $< 1,5 \%$  (The Chinese Journal of Nonferrous Metals, 2024).

Le TaC augmente l'énergie de liaison des joints de grains (de  $1,0 \text{ J/m}^2$  à  $1,2\text{-}1,3 \text{ J/m}^2$ ) et réduit le taux de croissance des fissures de 15 à 20 % (ITIA 2024).

#### 2. Optimisation du mélange et du pressage

##### Uniformité du mélange :

Un broyeur à boulets planétaire a été utilisé pour le mélange (16 à 24 heures, 400 à 600 tr/min) pour garantir que l'écart de distribution du carbone était  $< 0,05 \%$  en poids et que la porosité était réduite d'environ 0,03 % à 0,05 % (Journal of Materials Science 2025).

#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

L'utilisation de dispersants (tels que l'acide stéarique 0,1 % à 0,3 %) et la technologie de dispersion par ultrasons peuvent réduire l'agglomération de la poudre de WC et améliorer l'uniformité de 10 % à 15 % (ITIA 2024).

La sélection d'un liant à faible teneur en résidus de carbone (tel que le PEG ou le PVA, avec un taux de résidus de carbone < 0,03 %) peut éviter la génération de gaz et réduire la porosité d'environ 0,02 % (The Chinese Journal of Nonferrous Metals 2024).

#### **Processus de pressage :**

Le contrôle de la pression de pressage (50-100 MPa) pour éviter la concentration de contraintes causée par une pression inégale peut réduire le taux de formation de fissures d'environ 10 à 15 % (ITIA 2024).

Le pressage isostatique (200-300 MPa) est utilisé pour augmenter la densité du corps vert et réduire la porosité d'environ 0,05 % (Journal of Materials Science 2025).

### **3. Optimisation du processus de frittage**

#### **Contrôle de l'atmosphère :**

Frittage sous vide (degré de vide <  $10^{-3}$  Pa), contrôle de l'oxygène < 0,05 %, de l'humidité < 0,03 %, évite l'oxydation du carbone et réduit le taux de formation de phase amorphe d'environ 15 à 20 % (« The Chinese Journal of Nonferrous Metals » 2024).

En utilisant une atmosphère protectrice (telle que Ar ou H<sub>2</sub> / Ar mélange, H<sub>2</sub> < 2%) et en contrôlant le potentiel carbone à 0,8-1,0, les taux de carburation et de décarburation sont réduits d'environ 10 % (ITIA 2024).

#### **Température et refroidissement :**

La température de frittage est contrôlée à 1350-1450°C ( $\pm 5^\circ\text{C}$ ) et le temps de maintien est de 1 à 1,5 heure pour garantir que les particules sont entièrement diffusées et que la porosité est < 0,05 % (ISO 3326:2013).

La vitesse de refroidissement est contrôlée à 10-20°C/s pour réduire les contraintes thermiques et la profondeur des fissures est réduite de 10  $\mu\text{m}$  à 5-6  $\mu\text{m}$  (Journal of Materials Science 2025).

En adoptant un refroidissement par étapes (1450°C à 1000°C à 20°C/s, 1000°C à température ambiante à 5°C/s), le stress thermique est réduit d'environ 20 à 30 % (ITIA 2024).

#### **Processus HIP :**

Le pressage isostatique à chaud (HIP, 150-200 MPa, 1350-1400°C) élimine la microporosité, réduit la porosité à 0,04%-0,05% et augmente la résistance à la flexion de 5%-8% (de 3800 MPa à 4000-4100 MPa, ASTM B406).

Après HIP, la dureté augmente de 100 à 120 HV et la résistance à l'usure augmente d'environ 15 à 20 % (ASTM G65).

### **4. Tests et retours d'information**

#### **Surveillance en ligne :**

En utilisant la spectroscopie infrarouge pour surveiller l'atmosphère de frittage (teneur en CO, CO<sub>2</sub>, H<sub>2</sub>O) et ajuster l'atmosphère en temps réel, la porosité et le taux de formation de phase amorphe

#### **COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT**

peuvent être réduits d'environ 10 à 15 % (ITIA 2024).

La technologie d'émission acoustique est utilisée pour détecter les microfissures pendant le processus de frittage, et la précision de détection des fissures est améliorée à  $\pm 0,5 \mu\text{m}$  (The Chinese Journal of Nonferrous Metals, 2024).

#### **Analyse microscopique :**

En combinant l'analyse SEM, TEM et XRD de la taille des pores (10-100 nm), de la profondeur des fissures (5-10  $\mu\text{m}$ ) et du rapport de phase amorphe (< 2 %), le taux de défauts est réduit d'environ 15 à 20 % (Journal of Materials Science 2025).

La diffraction des électrons rétrodiffusés (EBSD) a été utilisée pour analyser la distribution des contraintes aux joints de grains, et les paramètres du processus ont été optimisés pour contrôler l'écart de contrainte aux joints de grains à  $\pm 50 \text{MPa}$  (ITIA 2024).

#### **Test de performance :**

Effectuer régulièrement des tests de résistance à la flexion (ASTM B406), de dureté (ISO 6507) et de résistance à l'usure (ASTM G65), établir une base de données sur les défauts et les performances et optimiser le processus (The Chinese Journal of Nonferrous Metals, 2024).

### **5. Post-traitement et optimisation de surface**

#### **Traitement de surface :**

Le polissage élimine les pores de surface et les microfissures (épaisseur 0,01-0,03 mm), la rugosité de surface  $R_a < 0,2 \mu\text{m}$  et la résistance à la corrosion est améliorée d'environ 10 à 15 % (ASTM G31).

PVD TiAlN ou CrN (épaisseur 2-5  $\mu\text{m}$ ) améliore la dureté de surface (+200 HV) et la résistance à l'oxydation (gain de poids d'oxydation à 1200°C < 0,1 mg/cm<sup>2</sup>), et l'adhérence du revêtement est améliorée de 15%-20% (ASTM C633).

#### **Traitement thermique :**

Le recuit à basse température (600-800°C, 1 heure) libère les contraintes résiduelles et réduit la profondeur des fissures d'environ 20 à 30 %, de 10  $\mu\text{m}$  à 7-8  $\mu\text{m}$  (Journal of Materials Science 2025). La nitruration à basse température (500-600°C, 2 heures) améliore la résistance à la corrosion de surface et réduit le taux de corrosion d'environ 15 % (ASTM G31).

### **6. Optimisation de l'adaptabilité environnementale**

#### **Résistance à la corrosion améliorée :**

En utilisant une phase liante à base de Ni (WC-Ni) au lieu d'une phase à base de Co, la chute de résistance dans un environnement chaud et humide (40°C, 90% d'humidité) est réduite de 5% à 1,5%-2%, et le taux de corrosion est < 0,03 mm/an (ITIA 2024).

L'ajout de Cr (0,5 % à 1 %) pour former une couche protectrice de Cr<sub>2</sub>O<sub>3</sub> améliore la résistance à la corrosion d'environ 20 % et réduit le taux de corrosion dans un environnement de brouillard salin à 0,025 à 0,03 mm/an (ASTM G31).

#### **Stabilité à haute température :**

#### **COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT**

L'ajout de TiC ou de TaC (5 à 10 %) améliore la résistance à l'oxydation, avec un gain de poids d'oxydation à 1 000 °C inférieur à 0,08 mg/cm<sup>2</sup> et un taux de défauts réduit d'environ 10 à 15 % (ITIA 2024).

Optimiser la distribution de la phase cobalt (épaisseur 0,1-0,5 μm), réduire le taux de volatilisation du cobalt d'environ 0,5%-1% à haute température et réduire le taux de formation de phase amorphe d'environ 15% (The Chinese Journal of Nonferrous Metals, 2024).

## 7. Contrôle intelligent des processus

### Optimisation de l'IA :

L'utilisation de l'intelligence artificielle (IA) pour optimiser les paramètres de mélange et de frittage peut améliorer l'uniformité de 10 à 15 % et réduire la porosité d'environ 0,03 à 0,05 % (ITIA 2024). L'apprentissage automatique prédit la formation de défauts (par exemple, pores, fissures), réduisant les taux de défauts d'environ 20 à 25 % (Journal of Materials Science, 2025).

### Commentaires en temps réel :

L'introduction de la surveillance en ligne de la température (précision ± 2 °C) et de la surveillance de la pression (précision ± 5 MPa) a réduit le taux de défauts lors du frittage d'environ 15 à 20 % (ITIA 2024).

Le système de contrôle intelligent ajuste le taux de refroidissement, réduisant ainsi la contrainte thermique d'environ 20 à 30 % et le taux de formation de fissures d'environ 15 % (The Chinese Journal of Nonferrous Metals, 2024).

### Effet global

Grâce à la méthode ci-dessus, la porosité du carbure cémenté peut être réduite à 0,04 %-0,05 %, la profondeur de fissure < 5 μm, le rapport de phase amorphe < 1 % et le taux de défauts global est réduit de 20 % à 30 % (ITIA 2024).

Améliorations significatives des performances : résistance à la flexion augmentée de 5 à 10 % (jusqu'à 4 000 à 4 200 MPa), dureté augmentée de 100 à 150 HV, résistance à l'usure augmentée de 15 à 20 % (ASTM G65) et durée de vie prolongée d'environ 30 à 40 % (Journal of Materials Science 2025).

Dans les environnements à fort impact (fréquence > 2000 fois/minute) et chauds et humides (40°C, 90% d'humidité), la durabilité et la fiabilité du carbure cémenté optimisé sont améliorées d'environ 25% à 35% (Journal of the Chinese Society of Nonferrous Metals, 2024).

## 2.4 Technologie de caractérisation de la microstructure

Les techniques de caractérisation avancées fournissent des outils précis pour analyser la microstructure et l'état de phase du carbure cémenté, soutenant l'optimisation des performances et le contrôle qualité.

### 2.4.1 Applications du MEB, du TEM et de l'EBSD

#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

Le microscope électronique à balayage (MEB , résolution < 1 nm) est utilisé pour caractériser la morphologie et la distribution des grains de WC (0,110 µm) et des phases de liaison (530 nm ± 2 nm). L'imagerie par électrons rétrodiffusés (ESB) distingue le WC du Co. L'uniformité des grains de carbure cémenté contenant 10 % de Co est > 95 % ± 2 %, et la porosité est < 0,1 % ± 0,02 %. Le MEB permet également de détecter les fissures (0,52 µm) et les pores (10 - 100 nm), ce qui constitue une base pour l'optimisation du procédé. Par exemple, après un traitement HIP, la porosité est réduite à 0,05 % et la dureté est augmentée de 5 % ± 1 %.

Le microscope électronique à transmission (MET , résolution < 0,2 nm) révèle la structure atomique de l' interface WC( 0001)/ Co( 111), avec un décalage de réseau de < 2 % ± 0,2 %, et la diffraction électronique sélective (SAED ) vérifie que l'espacement d\_0001 du WC est de 2,837 Å ± 0,005 Å. Le carbure cémenté contenant du Cr présente une ségrégation du Cr (concentration 0,5 % ± 1 % ± 0,2 %), formant une couche de Cr<sub>2</sub> O<sub>3</sub>, ce qui améliore la résistance à la corrosion de 30 % ± 5 %. Le TEM peut également analyser la phase amorphe (épaisseur 510 nm) et guider le contrôle de la teneur en carbone (5,8 % ± 6,2 %). Par exemple, la microscopie électronique en transmission (MET) optimise l'interface du carbure cémenté contenant du Mo (travail de liaison 2,8 J/m<sup>2</sup> ) , prolongeant ainsi la durée de vie de l'outil de 15 % ± 2 %.

Français La diffraction d'électrons rétrodiffusés (EBSD ) a été utilisée pour étudier l'orientation des grains et la distribution des contraintes. Le carbure à grains fins (0,51 µm) a montré une orientation aléatoire, tandis que le carbure à grains grossiers (510 µm) a montré une orientation préférentielle <0001> (intensité >2 mrd±0,2 mrd ) . L'EBSD a déterminé une contrainte résiduelle <200 MPa±10 MPa, qui a été réduite de 10 % ± 2 % par recuit (500 °C, 2 heures). L'uniformité des contraintes du carbure cémenté contenant du TaC a été améliorée de 20 % et le taux d'amorçage de fissures a été réduit de 15 % ± 3 %. Par exemple, la fracture du carbure cémenté contenant 12 % de Co a montré une fracture transgranulaire , avec une ténacité  $K_{Ic} = 14 \text{ MPa} \cdot \text{m}^{1/2} \pm 0,5$ .

Dans les applications pratiques, le MEB, le MET et l'EBSD fonctionnent ensemble pour analyser la microstructure. Par exemple, un outil en carbure cémenté contenant 10 % de Co présente une granulométrie de 1,5 µm ± 0,2 µm confirmée par MEB, une couche de Co de 15 nm ± 2 nm vérifiée par MET et une contrainte < 150 MPa ± 10 MPa déterminée par EBSD, ce qui garantit que les performances sont conformes à la norme de coupe (dureté HV 1800 ± 30,  $K_{Ic} = 12 \text{ MPa} \cdot \text{m}^{1/2}$  ) .

#### 2.4.2 Diffraction des rayons X (DRX) et spectrométrie dispersive en énergie (EDS A )

La diffraction des rayons X (DRX ) est utilisée pour caractériser la composition de phase et la structure cristalline du carbure cémenté. Les pics principaux du WC sont situés à  $2\theta=31,5^\circ$  et  $35,6^\circ \pm 0,1^\circ$ , et la plage de granulométrie est de 0,110 µm. Le décalage du pic causé par la contrainte résiduelle est <  $0,1^\circ \pm 0,02^\circ$ , reflétant la contrainte de frittage (<200 MPa). Le carbure cémenté contenant du TiC montre que le pic de la solution solide ( W , Ti )C se décale de  $0,2^\circ \pm 0,05^\circ$ , et la teneur en carbone doit être contrôlée (5,8 % ± 6,2 %) pour éviter la phase η ( $2\theta \approx 40^\circ \pm 0,5^\circ$ ). La DRX

#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

peut également détecter la phase amorphe ( pic large  $2\theta \approx 35^\circ \pm 0,5^\circ$ ). La proportion de phase amorphe dans le carbure cémenté contenant du VC est  $< 2 \% \pm 0,5 \%$  et la dureté est augmentée de  $5 \% \pm 1 \%$ .

Analyse du spectre de diffraction d'énergie (EDS) A ) a déterminé la distribution des éléments. L'écart de distribution du Co du carbure cémenté contenant 10 % de Co était  $< 3 \% \pm 0,5 \%$ , et la concentration de ségrégation de Cr était de  $0,5 \% \pm 0,2 \%$ . Le taux de corrosion du carbure cémenté contenant 12 % de Ni dans un environnement acide (pH 3, HCl) était de  $0,03 \text{ mm/an} \pm 0,005 \text{ mm/an}$ , et l'EDS A a confirmé que l'uniformité de la couche de Ni était  $> 95 \% \pm 2 \%$ . Un environnement chaud et humide ( $40^\circ\text{C}$ , 90 % d'humidité) peut provoquer une ségrégation du Co (l'écart augmente à  $5 \% \pm 1 \%$ ), et le carbure cémenté à base de Ni est plus stable (écart  $< 2 \%$ ).

La DRX et l'EDS A permettent d'évaluer pleinement la microstructure. Par exemple, la DRX a confirmé que la granulométrie du carbure cémenté contenant 10 % de Co était de  $1,5 \mu\text{m} \pm 0,2 \mu\text{m}$  et qu'il n'y avait pas de phase  $\eta$ ; l'EDS A a vérifié que l'épaisseur de Co était de  $15 \text{ nm} \pm 2 \text{ nm}$ , la ségrégation de Cr de  $1 \% \pm 0,2 \%$  et que les performances étaient conformes à la norme d'outil (dureté  $\text{HV } 1800 \pm 30$ ,  $K_{1c} < 12 \text{ MPa}\cdot\text{m}^{1/2} \pm 0,5$ ). Dans les applications pratiques, le rapport de solution solide des moules en carbure cémenté contenant du TiC a été optimisé par la DRX et l'EDS A ( $\text{Ti/W} = 0,1 \pm 0,02$ ), la résistance à l'usure a été améliorée de 20 % et la durée de vie était supérieure à  $6\,000 \text{ heures} \pm 500 \text{ heures}$ .

## Références

- Classé selon le style APA, il contient 16 articles en anglais et en chinois, axés sur la microstructure et l'état de phase.
- Exner, HE (1979). Nature physique et chimique des carbures cémentés. *International Metals Reviews*, 24(1), 149173. <https://doi.org/10.1179/imtr.1979.24.1.149>
- Exner, HE (1979). Nature physique et chimique des carbures cémentés. *International Metals Reviews*, 24(1), 149173.
- Gurland, J. (1988). La ténacité à la rupture des carbures cémentés. *Journal of Metals*, 40(7), 1923.
- Lassner, E., & Schubert, WD (1999). *Tungstène : propriétés, chimie, technologie de l'élément, alliages et composés chimiques*. New York, État de New York : Springer.
- Prakash, LJ (2014). Métaux durs : structure, propriétés et performances. Dans V. K. Sarin (éd.), *Comprehensive hard materials* (vol. 1, p. 2954). Oxford, Royaume-Uni : Elsevier.
- Prakash, LJ (2014). Carbure cémenté : structure, propriétés et performances. Dans V. K. Sarin (éd.), *Complete Book of Hard Materials* (vol. 1, p. 2954). Oxford, Royaume-Uni : Elsevier Publishing.
- Upadhyaya, GS (1998). Carbures de tungstène cémentés : production, propriétés, et tests. Norwich, NY : William Andrew Publishing.
- Wang, H., et Fang, ZZ (2019). Propriétés thermiques et mécaniques des carbures cémentés en conditions extrêmes. *Revue internationale des métaux réfractaires et des matériaux durs*, 82, 7685.
- Zhang, L., et Chen, S. (2017). Comportement à la corrosion des carbures cémentés en milieu acide. *Corrosion Science*, 125, 8795.
- Chen, X., et Zhang, Y. (2022). Étude DFT de l'interface WCCo dans les carbures cémentés. *Science des matériaux*

## COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

computationnelle . 201 , 110873 .

Li, J., et Wang, S. (2021). Caractérisation microstructurale des carbures cimentés par microscopie avancée. *Caractérisation des matériaux* , 178, 111234.

Chinatungsten Online. (2023). Propriétés et applications du carbure cimenté . Extrait de <http://news.chinatungsten.com/cn/tungstencarbideinformation>

, LQ, & Li, WP (2018). Progrès dans la technologie de fabrication du carbure cimenté . *Revue des matériaux* , 32(10), 16531660 .

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

, W., & Zhang, H. (2020). Étude du comportement à l'oxydation à haute température des *carbures cimentés*. *Journal of Materials Science and Engineering*, 38(4) , 512518 .

, T., & Chen, M. (2019). Progrès dans la cinétique de frittage des carbures cimentés. *Technologie de la métallurgie des poudres* , 37(5), 321329 .

Garcia, J., & Ciprés , VC (2018). Mécanismes d'usure des carbures cimentés dans les applications de coupe. *Usure* , 408409, 126134.

Garcia, J., & Ciprés , VC (2018). Mécanismes d'usure des carbures cimentés dans les applications de coupe. *Usure*, 408409, 126134.

Fang, ZZ et Koopman, MC (2017). Progrès dans le traitement et les propriétés du carbure cimenté. *Revue annuelle de recherche sur les matériaux* , 47, 381403.

## 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](mailto:sales@chinatungsten.com)

**Tel :** +86 592 5129696

**Official website :** [www.ctia.com.cn](http://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](http://www.ctia.com.cn)

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



appendice:

### Quels types de carbure cémenté existe-t-il selon les différents grains de carbure de tungstène ?

Le carbure cémenté est un matériau composite dont la principale phase dure est le carbure de tungstène (WC) et la phase de liaison est le cobalt (Co) ou le nickel (Ni). Ses performances et ses domaines d'application sont étroitement liés à la granulométrie du WC. La granulométrie affecte non seulement la dureté et la ténacité, mais a également un impact important sur la résistance à l'usure, la résistance aux chocs, la stabilité à haute température et la précision d'usinage du matériau. Selon la granulométrie du WC, le carbure cémenté peut être divisé en plusieurs catégories, des grains grossiers traditionnels aux grains nanométriques modernes, afin de répondre aux différents besoins industriels. Voici une description complète de la classification détaillée et de ses caractéristiques :

#### 1. Carbure cémenté à gros grains

Taille des grains :  $> 5 \mu\text{m}$  (généralement 5-20  $\mu\text{m}$ , ISO 513).

##### Caractéristiques du carbure cémenté à gros grains

Les carbures cémentés à gros grains sont plus gros, le nombre de joints de grains est plus faible, la phase de liaison (Co) est uniformément répartie et la proportion de la surface des joints de grains par rapport au volume total n'est que d'environ 5 à 10 % (Journal of Materials Science 2025). Cela confère au matériau une meilleure résistance aux chocs et à la fatigue.

La dureté est relativement faible, allant de HV 1200 à 1500, mais la résistance à la flexion (TRS)

#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

est relativement élevée, atteignant 2200 à 2500 MPa, et la ténacité à la rupture (KIC) est de 15 à 20 MPa·m<sup>1/2</sup> (Journal de la Société chinoise des métaux non ferreux, 2024).

La résistance à l'usure est relativement modérée, avec un taux d'usure d'environ 0,08-0,10 mm<sup>3</sup> / N·m (test ASTM G65), mais elle fonctionne bien sous des charges d'impact élevées et convient aux environnements de travail soumis à des chocs et vibrations sévères.

Il présente une bonne stabilité à haute température, avec un taux de rétention de dureté d'environ 85%-90% à 800°C, ce qui convient aux conditions de travail à température moyenne et élevée (ITIA 2024).

### **Microstructure du carbure cémenté à gros grains**

L'analyse par microscopie électronique à balayage (MEB) montre que les grains de WC sont polygonaux, l'épaisseur de la phase de cobalt entre les grains est d'environ 1 à 3 μm et la force de liaison des joints de grains est relativement élevée, environ 1,5 à 2 J/m<sup>2</sup> (Journal of Materials Science 2025).

La taille plus grande des grains entraîne une résistance moindre au glissement des joints de grains, ce qui contribue à absorber l'énergie d'impact et à réduire la propagation des fissures.

### **Application du carbure cémenté à gros grains**

Le carbure à gros grains est principalement utilisé pour les outils miniers, les forets, les équipements de creusement de tunnels et les matrices d'emboutissage de grandes dimensions. Il est adapté aux applications soumises à de fortes charges d'impact, comme le forage dans le granit ou le basalte (ISO 513).

Dans le forage minier, la durée de vie du trépan peut atteindre 1 500 à 2 000 mètres, en particulier dans des conditions de roche dure, montrant une résistance élevée à la fracture (ITIA 2024).

Il est également couramment utilisé dans les pièces résistantes à l'usure des machines lourdes, telles que les dents de godet d'excavatrice, qui peuvent résister aux chocs et à l'usure répétés (Journal of the Chinese Society of Nonferrous Metals, 2024).

### **Préparation de carbure cémenté à gros grains**

Le procédé de métallurgie des poudres classique est utilisé. La matière première est une poudre de WC grossière (5-20 μm). Après mélange, les matériaux sont pressés pour obtenir leur forme. La température de frittage est généralement comprise entre 1 400 et 1 450 °C et le temps de maintien est de 1 à 2 heures.

La répartition de la phase cobalt doit être contrôlée pendant le frittage afin d'éviter une croissance anormale des grains. Une faible quantité de TaC (0,5 à 1 %) est généralement ajoutée pour inhiber la croissance des grains (ITIA 2024).

La vitesse de refroidissement est contrôlée à 5-10°C/min pour éviter que des contraintes excessives aux joints de grains ne provoquent des microfissures (Journal of Materials Science 2025).

#### **COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT**

## 2. Carbure mésocristallin

Granulométrie : 1-5  $\mu\text{m}$  (ISO 513).

### Caractéristiques du carbure cimenté mésocristallin :

Le carbure cimenté mésogène est modéré et la proportion de la surface limite des grains par rapport au volume total est d'environ 15 à 20 %, ce qui permet d'obtenir un bon équilibre entre dureté et ténacité (Journal of Materials Science 2025).

La dureté est HV 1500-1800, la résistance à la flexion est de 2000-2300 MPa et la ténacité à la rupture est de 10-15  $\text{MPa} \cdot \text{m}^{1/2}$  (The Chinese Journal of Nonferrous Metals 2024).

La résistance à l'usure est environ 10 à 15 % supérieure à celle du carbure cimenté à gros grains, et le taux d'usure est d'environ 0,06 à 0,08  $\text{mm}^3 / \text{N} \cdot \text{m}$  (test ASTM G65).

Il présente à la fois une résistance aux chocs et une stabilité à haute température, avec un taux de rétention de dureté d'environ 90 à 95 % à 600 °C, ce qui le rend adapté aux environnements de traitement à charge moyenne et à température moyenne (ITIA 2024).

### Microstructure du mésocristal carbure :

L'analyse SEM montre que les grains de WC sont des polygones réguliers, l'épaisseur de la phase de cobalt entre les grains est d'environ 0,5 à 1  $\mu\text{m}$  et la force de liaison des joints de grains est de 1,2 à 1,5  $\text{J}/\text{m}^2$  (Journal of Materials Science 2025).

L'augmentation du nombre de joints de grains rend la propagation des fissures plus sinueuse, améliorant ainsi la résistance du matériau à la fissuration. Parallèlement, la granulométrie modérée assure une dureté plus élevée.

### Application du carbure cimenté mésocristallin :

Il est largement utilisé dans les outils de coupe à usage général (tels que les fraises et les outils de tournage), les matrices d'emboutissage, les rouleaux et les pièces résistantes à l'usure. Il convient à l'usinage de l'acier à teneur moyenne en carbone, de la fonte ou de l'acier inoxydable de faible dureté (ISO 513).

Dans des conditions de vitesse de coupe de 150 à 200 m/min, la durée de vie de l'outil peut atteindre 1,5 à 2 heures, montrant notamment de bonnes performances anti-écaillage lors de la coupe intermittente (Journal of Materials Science 2025).

Il convient également à la fabrication de moules de précision moyenne, tels que les matrices d'emboutissage pour pièces automobiles, et peut résister à des chocs et à une usure moyens (Journal of the Chinese Society of Nonferrous Metals, 2024).

### de carbure cimenté mésocristallin :

#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

Une poudre de WC de taille moyenne (1 à 5  $\mu\text{m}$ ) a été utilisée et mélangée dans un broyeur à boulets planétaire (12 à 16 heures à une vitesse de 300 à 400 tr/min) pour assurer l'uniformité.

La température de frittage est contrôlée à 1350-1400°C, le temps de maintien est de 1 à 1,5 heure et des inhibiteurs de grains (tels que  $\text{Cr}_3\text{C}_2$  0,3%-0,5%) sont ajoutés pour contrôler la croissance des grains.

Après frittage, un pressage isostatique à chaud (HIP, 100-120 MPa, 1350°C) peut être utilisé pour réduire davantage la porosité (<0,02%, ISO 3326:2013).

### 3. Carbure cémenté à grains fins

Granulométrie : 0,5-1  $\mu\text{m}$  (ISO 513).

#### **cémenté à grains fins :**

Les carbures cémentés à grains fins sont petits et la surface intergranulaire représente environ 25 à 30 % du volume total. L'effet intergranulaire améliore considérablement la dureté et la résistance à l'usure du matériau (Journal of Materials Science 2025).

La dureté est HV 1800-2000, la résistance à la flexion est de 1800-2200 MPa et la ténacité à la rupture est de 8-12  $\text{MPa}\cdot\text{m}^{1/2}$  (The Chinese Journal of Nonferrous Metals 2024).

La résistance à l'usure est environ 20 à 30 % supérieure à celle du carbure cémenté mésogène et le taux d'usure est d'environ 0,04 à 0,06  $\text{mm}^3 / \text{N}\cdot\text{m}$  (test ASTM G65).

La ténacité diminue légèrement, mais les performances à haute température sont excellentes, avec un taux de rétention de dureté d'environ 88%-92% à 800°C, ce qui convient au traitement de haute précision (ITIA 2024).

#### **Microstructure du carbure cémenté à grains fins :**

L'analyse par microscopie électronique à transmission (MET) et par microscopie électronique à transmission (MET) a montré que les grains de WC étaient presque circulaires ou légèrement polygonaux, l'épaisseur de la phase de cobalt entre les grains était d'environ 0,2 à 0,5  $\mu\text{m}$  et la force de liaison des joints de grains était de 1,0 à 1,3  $\text{J}/\text{m}^2$  (Journal of Materials Science 2025).

Les grains fins augmentent la résistance au glissement des joints de grains et améliorent la résistance à l'usure du matériau, mais ils augmentent également la possibilité d'initiation de fissures.

#### **cémenté à grains fins :**

Convient aux outils de coupe de précision (tels que les outils de tournage, les fraises), les moules de précision et les pièces résistantes à l'usure, le traitement de l'acier inoxydable, de l'acier trempé (HV 40-50 HRC) ou des alliages à haute résistance (ISO 513).

Lors de la découpe de l'acier inoxydable (200 m/min), la durée de vie de l'outil peut atteindre 2 à 3 heures, notamment en coupe continue, avec une bonne finition de surface ( $R_a < 0,4 \mu\text{m}$ ) (Journal of Materials Science, 2025).

#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

Il est également utilisé pour fabriquer des matrices d'emboutissage et des matrices de tréfilage de haute précision, qui peuvent répondre aux exigences de tolérance  $< 0,01$  mm (Journal de la Société chinoise des métaux non ferreux, 2024).

#### **cémenté à grains fins :**

Utiliser de la poudre WC à grains fins ( $0,5-1 \mu\text{m}$ ), un broyage à billes à haute énergie (16-24 heures, vitesse de rotation 400-600 tr/min) et ajouter des inhibiteurs de grains (tels que  $\text{Cr}_3\text{C}_2$  0,3%-0,5% ou VC 0,1%-0,3%).

La température de frittage a été contrôlée à  $1350-1380^\circ\text{C}$  et le temps de maintien était de 1 heure pour éviter la croissance des grains.

Après frittage, le HIP ( $120-150$  MPa,  $1350^\circ\text{C}$ ) peut être utilisé pour éliminer la microporosité et la porosité est  $< 0,015$  % (ISO 3326:2013).

#### **4. Carbure cémenté à grains ultrafins**

Granulométrie :  $0,2-0,5 \mu\text{m}$  (ISO 513).

#### **Caractéristiques du carbure cémenté à grains ultrafins :**

Les carbures cémentés à grains ultrafins sont extrêmement petits, et la zone de joint de grain représente environ 35 à 40 % du volume total. L'influence de l'effet de joint de grain sur les performances est plus significative (Journal of Materials Science 2025).

La dureté est HV 1900-2200, la résistance à la flexion est de 1700-2000 MPa et la ténacité à la rupture est de  $7-10 \text{ MPa}\cdot\text{m}^{1/2}$  (The Chinese Journal of Nonferrous Metals 2024).

carbure cémenté à grains fins et le taux d'usure est d'environ  $0,03$  à  $0,05 \text{ mm}^3 / \text{N}\cdot\text{m}$  (test ASTM G65).

Les performances à haute température sont encore améliorées, avec un taux de rétention de dureté d'environ 85%-90% à  $1000^\circ\text{C}$ , ce qui le rend adapté au traitement à haute charge et à haute température (ITIA 2024).

La finition de surface est excellente et la rugosité de surface de la pièce après traitement peut atteindre  $\text{Ra } 0,2-0,3 \mu\text{m}$  (Journal de la Société chinoise des métaux non ferreux, 2024).

#### **Microstructure en carbure cémenté à grains ultrafins :**

L'analyse TEM montre que les grains de WC sont presque ronds, l'épaisseur de la phase de cobalt entre les grains est d'environ  $0,1$  à  $0,3 \mu\text{m}$  et la force de liaison des joints de grains est de  $0,8$  à  $1,2 \text{ J/m}^2$  (Journal of Materials Science 2025).

Le nombre extrêmement élevé de joints de grains rend le chemin de propagation des fissures plus complexe, améliorant encore la résistance à l'usure, mais la diminution de la ténacité augmente le défi de la résistance aux chocs.

#### **COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT**

### **Applications du carbure cémenté à grains ultrafins :**

Pour l'usinage ultra-précis d'outils (par exemple forets PCB, micro-fraise), d'outils de perforation et de substrats revêtus en alliages de titane, superalliages à base de nickel ou aciers trempés (HV 50-60 HRC) (ISO 513).

Lors de la coupe d'alliage de titane (150 m/min), la durée de vie de l'outil peut atteindre 3 à 4 heures, montrant notamment une excellente stabilité dimensionnelle dans l'usinage de haute précision (Journal of Materials Science, 2025).

Il est également utilisé pour fabriquer des matrices de tréfilage de haute précision et des micro-moules pour répondre aux exigences de haute précision du traitement des composants électroniques (tolérance < 0,005 mm) (Journal de la Société chinoise des métaux non ferreux, 2024).

### **carbure cémenté à grains ultrafins :**

Utilisez de la poudre WC ultrafine (0,2-0,5  $\mu\text{m}$ ), un broyage à billes à haute énergie (24-36 heures, vitesse de rotation 500-800 tr/min) et ajoutez un inhibiteur de grains (tel que VC 0,1%-0,3%).

La température de frittage est contrôlée à 1320-1350°C et le temps de maintien est de 0,5 à 1 heure pour éviter la croissance des grains.

Le pressage isostatique à chaud (HIP, 150 MPa, 1350°C) ou le frittage par plasma d'étincelles (SPS, 1300°C, 50 MPa) sont utilisés, et la taille des grains est contrôlée avec précision à 0,2-0,5  $\mu\text{m}$  (ITIA 2024).

### **5. Carbure cémenté de qualité nano**

Granulométrie : 0,05-0,2  $\mu\text{m}$  (ISO 513).

### **Caractéristiques du carbure cémenté de qualité nanométrique :**

Les grains de carbure cémenté de qualité nanométrique atteignent l'échelle nanométrique, et la surface intergranulaire représente jusqu'à 45 à 50 % du volume total. L'effet intergranulaire est extrêmement prononcé, ce qui améliore considérablement la dureté et la résistance à l'usure (Journal of Materials Science 2025).

La dureté est HV 2000-2400, la résistance à la flexion est de 1600-1900 MPa et la ténacité à la rupture est de 6-9  $\text{MPa}\cdot\text{m}^{1/2}$  (The Chinese Journal of Nonferrous Metals 2024).

La résistance à l'usure est environ 10 à 15 % supérieure à celle du carbure cémenté à grains ultrafins, et le taux d'usure est d'environ 0,02 à 0,04  $\text{mm}^3 / \text{N}\cdot\text{m}$  (test ASTM G65).

L'effet nano améliore la stabilité à haute température, avec une rétention de dureté > 90 % à 1 000 °C et HV 1 800-2 000 à 1 200 °C (ITIA 2024).

La finition de surface et la précision du traitement sont extrêmement élevées et la rugosité de surface de la pièce peut atteindre Ra 0,1-0,2  $\mu\text{m}$  (Journal de la Société chinoise des métaux non ferreux

#### **COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT**

2024).

En raison de la taille extrêmement petite des grains, de la faible résistance aux chocs et de la faible ténacité à la rupture, les performances doivent être améliorées par un revêtement (tel que TiAlN) ou une structure à gradient (ITIA 2024).

#### **Microstructure du carbure cémenté à l'échelle nanométrique :**

L'analyse TEM et la microscopie à force atomique (AFM) ont montré que les grains de WC étaient approximativement sphériques, l'épaisseur de la phase de cobalt entre les grains n'était que de 0,05 à 0,1  $\mu\text{m}$  et la force de liaison des joints de grains était de 0,7 à 1,0  $\text{J}/\text{m}^2$  (Journal of Materials Science 2025).

La résistance au glissement des joints de grains est extrêmement élevée, ce qui améliore considérablement la résistance à l'usure, mais la concentration de contraintes aux joints de grains augmente également le risque d'initiation de fissures.

#### **Applications du carbure cémenté de qualité nanométrique :**

Convient pour la découpe de très haute précision (comme le traitement de moules optiques), le traitement de micro-moules et de composants électroniques, le traitement de matériaux à haute dureté (HV 60-70 HRC) ou de métaux non ferreux (comme l'alliage d'aluminium) (ISO 513).

Lors du traitement par micro-perçage (vitesse de coupe 100 m/min), la durée de vie peut atteindre 4 à 5 heures, en particulier lors du traitement de cartes de circuits imprimés de haute précision (PCB), elle présente une stabilité dimensionnelle extrêmement élevée (Journal of Materials Science 2025).

Il est également utilisé pour fabriquer des matrices de tréfilage ultra-minces et des dispositifs médicaux (tels que des scalpels), répondant à une précision de traitement au niveau du micron (tolérance  $< 0,002\text{ mm}$ ) (Journal of the Chinese Society of Nonferrous Metals, 2024).

#### **Préparation de carbure cémenté à l'échelle nanométrique :**

Utiliser de la poudre WC à l'échelle nanométrique (0,05-0,1  $\mu\text{m}$ ), un broyage à billes à haute énergie (24-48 heures, vitesse de rotation 600-1000 tr/min) et ajouter des inhibiteurs de grains (tels que VC 0,1%-0,3% ou  $\text{Cr}_3\text{C}_2$  0,2%-0,4%).

En utilisant la technologie de frittage à basse température (1300-1350°C) ou de frittage assisté par champ (comme le frittage par plasma d'étincelles SPS, 1300°C, 50-80 MPa), la taille des grains est contrôlée avec précision à 0,05-0,2  $\mu\text{m}$ .

Utiliser des dispersants (tels que l'acide stéarique 0,1 % à 0,3 %) et la technologie de dispersion par ultrasons pour réduire l'agglomération de la poudre et améliorer l'uniformité de 10 % à 15 % (ITIA 2024).

#### **COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT**

Après frittage, un revêtement PVD TiAlN (épaisseur 2-3  $\mu\text{m}$ ) peut être appliqué pour améliorer la résistance à l'oxydation et à l'usure (Journal of Materials Science 2025).

## 6. Autres considérations de classification

### Carbure à grains composites :

Taille des grains : Combinez différentes tailles de grains (par exemple 0,2  $\mu\text{m}$  et 5  $\mu\text{m}$ ) pour former des structures à gradient ou bimodales .

### Caractéristiques du carbure cémenté à grains composites :

dureté (HV 1800-2000) et ténacité (KIC 10-15  $\text{MPa}\cdot\text{m}^{1/2}$ ) , la résistance à l'usure est améliorée de 10 à 20 % (Journal of Materials Science 2025).

La structure à gradient est une combinaison de cristaux fins (0,2-0,5  $\mu\text{m}$ ) sur la surface et de cristaux grossiers (5-10  $\mu\text{m}$ ) sur la couche interne, qui présente une forte résistance à l'usure de surface et une bonne résistance aux chocs internes (ITIA 2024).

Il présente d'excellentes performances à haute température, avec un taux de rétention de dureté d'environ 85%-90% à 1000°C, ce qui le rend adapté aux conditions de travail complexes (The Chinese Journal of Nonferrous Metals, 2024).

### Microstructure du carbure cémenté à grains composites :

L'analyse SEM montre que les grains de surface sont petits et les joints de grains sont denses ; les grains intérieurs sont plus gros, l'épaisseur de la phase cobalt est d'environ 1 à 2  $\mu\text{m}$  et la structure globale est clairement stratifiée (Journal of Materials Science 2025).

La structure à gradient réduit le taux de croissance des fissures et améliore la résistance à la fracture d'environ 15 % (ITIA 2024).

### Applications du carbure cémenté à grains composites :

Outils multifonctionnels (ex : matériaux aéronautiques) et moules complexes , usinage de matériaux composites ou d'alliages haute température (ISO 513).

Lors de la découpe de composites en fibre de carbone (150 m/min), la durée de vie de l'outil peut atteindre 3 à 4 heures (Journal de la Société chinoise des métaux non ferreux, 2024).

### Préparation du carbure cémenté à grains composites :

La technologie de pressage en couches est utilisée, avec de la poudre WC ultrafine (0,2-0,5  $\mu\text{m}$ ) utilisée pour la couche de surface et de la poudre WC grossière (5-10  $\mu\text{m}$ ) utilisée pour la couche intérieure.

La température de frittage était de 1400 °C, le temps de maintien était de 1 h et l'épaisseur de la couche de gradient était contrôlée (0,5-1 mm) (ITIA 2024).

### Carbure à grains dopés :

#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

Taille des grains : La taille des grains est ajustée par dopage, généralement de 0,5 à 2  $\mu\text{m}$  .

#### **Caractéristiques du carbure cémenté à grains dopés :**

En ajoutant du TiC , TaC ou NbC (5%-10%), la granulométrie est contrôlée à 0,5-2  $\mu\text{m}$  , la résistance à l'oxydation est améliorée (gain de poids d'oxydation à 1200°C <0,1 mg/cm<sup>2</sup> ) et la dureté est HV 1700-1900 (The Chinese Journal of Nonferrous Metals 2024).

La résistance à la corrosion est améliorée d'environ 10 à 15 %, et le taux de corrosion dans un environnement de brouillard salin est < 0,04 mm/an (ASTM G31).

La résistance à haute température est améliorée, avec une rétention de la résistance à la flexion d'environ 80 à 85 % à 1 000 °C (ITIA 2024).

#### **Microstructure du carbure cémenté à grains dopés :**

L'analyse SEM et par diffraction des rayons X (DRX) a montré que les éléments dopants (tels que TiC ) sont distribués sous forme de solution solide ou de particules de carbure, inhibant la croissance des grains de WC et augmentant la résistance des joints de grains d'environ 5 à 10 % (Journal of Materials Science 2025).

Les éléments dopants réduisent la volatilisation de la phase cobalt et améliorent la stabilité à haute température (ITIA 2024).

#### **Application du carbure cémenté à grains dopés :**

Outils de coupe à haute température (par exemple, traitement des matériaux des moteurs aérospatiaux) et composants résistants à la corrosion, tels que les vannes offshore (ISO 513).

Lors de la coupe d'alliages à haute température (250 m/min), la durée de vie de l'outil peut atteindre 2 à 3 heures (Journal de la Société chinoise des métaux non ferreux, 2024).

#### **Préparation du carbure cémenté à grains dopés :**

Dopés avec du TiC ou du TaC (5%-10%), les matériaux mélangés sont pressés en forme, la température de frittage est de 1350-1400°C et le temps de maintien est de 0,5 à 1 heure.

Utiliser une atmosphère protectrice (comme le gaz Ar ) pour le frittage afin d'éviter l'oxydation de la phase cobalt (ITIA 2024).

## **7. Normes et tests**

La norme ISO 513:2012 : Classification et applications des carbures cémentés fournit des lignes directrices sur la classification des applications coupantes et non coupantes en fonction de la taille et des propriétés des grains.

GB/T 20707-2006 : Détermination de la microstructure du carbure cémenté, définit la plage de granulométrie et la méthode d'essai.

ASTM E112-13 : Méthode de mesure de la granulométrie, utilisant la méthode de la section transversale ou la méthode d'interception linéaire pour mesurer le diamètre moyen des grains avec une erreur de < 5 %.

ISO 4499-2:2020 : Évaluation de la microstructure du carbure cémenté, examen de la distribution

#### **COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT**

des grains et de l'épaisseur de la phase cobalt.

ASTM G65-00(2010) : Essai d'usure de roue en sable sec/caoutchouc, évaluant la résistance à l'usure des carbures cémentés avec différentes granulométries.

Méthode de détection :

La microscopie électronique à balayage (MEB) et la microscopie électronique à transmission (MET) combinées à la diffraction des rayons X (DRX) peuvent mesurer avec précision la taille et la distribution des grains avec une erreur de  $< 5\%$  (Journal of Materials Science 2025).

La diffraction des électrons rétrodiffusés (EBSD) analyse l'orientation des joints de grains et la distribution des contraintes, et l'erreur d'orientation des joints de grains est contrôlée à  $\pm 2^\circ$  (The Chinese Journal of Nonferrous Metals, 2024).

L'analyseur de taille de particules laser mesure la distribution granulométrique de la poudre WC pour garantir la qualité de la poudre (ITIA 2024).

## 8. Tendances de développement

### Extension des applications du carbure cémenté de qualité nanométrique :

En 2024, la production chinoise de carbure cémenté de qualité nano représentait 15 à 20 % du total et devrait atteindre 25 à 30 % en 2025, principalement en raison de la croissance de la demande dans les domaines de l'électronique et de l'aérospatiale (ITIA 2024).

La proportion de carbure cémenté à l'échelle nanométrique dans le domaine du micro-usinage (comme le traitement des circuits imprimés 5G) a augmenté d'environ 20 %, et la précision du traitement a atteint  $\pm 0,001$  mm (« The Chinese Journal of Nonferrous Metals » 2024).

### Développement de structures composites à grains et à gradients :

Le taux d'application du carbure cémenté à structure à gradient dans le domaine aérospatial (comme les outils de traitement des aubes de turbine) a augmenté d'environ 10 à 15 %, et la durée de vie a été prolongée d'environ 20 à 30 % (Journal of Materials Science 2025).

En optimisant la répartition des grains, l'équilibre entre la résistance à l'usure et la ténacité du carbure cémenté à grains composites est amélioré d'environ 15 %, ce qui le rend adapté au traitement multi-matériaux (ITIA 2024).

### Promotion de la technologie de préparation verte :

La technologie de frittage assisté par champ (comme le SPS) devient de plus en plus populaire, réduisant le temps de frittage de 2 heures à 10-20 minutes, réduisant la consommation d'énergie d'environ 20 à 30 % et réduisant les émissions de CO<sub>2</sub> d'environ 25 % (ITIA 2024).

Avec l'avancement de la technologie de recyclage, le taux de recyclage du carbure cémenté en Chine atteindra 35 à 40 % en 2024 et devrait atteindre 45 % en 2025, permettant un recyclage efficace grâce à des méthodes de fusion du zinc et de lixiviation chimique (ITIA 2024).

#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

**Fabrication intelligente :**

La technologie de surveillance en ligne (telle que la surveillance par spectroscopie infrarouge de l'atmosphère de frittage) est appliquée au contrôle de la taille des grains, et l'écart de taille des grains est réduit de  $\pm 0,1 \mu\text{m}$  à  $\pm 0,05 \mu\text{m}$  (The Chinese Journal of Nonferrous Metals 2024).

L'intelligence artificielle (IA) optimise les paramètres de mélange et de frittage, améliorant l'uniformité d'environ 10 à 15 % et réduisant les taux de défauts d'environ 20 % (ITIA 2024).

**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](mailto:sales@chinatungsten.com)

**Tel :** +86 592 5129696

**Official website :** [www.ctia.com.cn](http://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](http://www.ctia.com.cn)

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



appendice:

**Types, mécanismes et optimisation de la porosité/taille des pores dans le carbure cimenté**  
**Types, mécanismes et optimisation de la porosité dans le carbure cimenté**

### 1. Aperçu du carbure cimenté et de la porosité

Le carbure cimenté est un matériau composite dont la phase dure principale est le carbure de tungstène (WC) et la phase liante est le cobalt (Co) ou le nickel (Ni). Fabriqué par métallurgie des poudres, il présente une dureté élevée (HV 1000–1800), une excellente résistance à l'usure et une ténacité appropriée ( $K_{IC} 8\text{--}20 \text{ MPa}\cdot\text{m}^{1/2}$ ). Il est largement utilisé dans les outils de coupe, les pics miniers et les pièces résistantes à l'usure. La porosité est un défaut clé du carbure cimenté, qui fait référence aux trous ou aux entrefers à l'intérieur du matériau, généralement exprimés en fraction volumique (0,01 à 2 %). La porosité affecte directement la densité (écart  $\pm 0,2 \text{ g/cm}^3$ ), la résistance (réduite de 10 à 30 %), la ténacité et la résistance à l'usure (perte d'usure augmentée de 20 à 50 mm<sup>3</sup>, ASTM G65) du carbure cimenté, et est un indicateur essentiel du contrôle qualité.

La porosité est causée par les matières premières, le formage et le frittage du procédé de métallurgie des poudres. Les normes internationales (telles que ISO 4505 et ASTM B276) classent la porosité (par exemple, A00–B08) et spécifient les méthodes d'essai (par exemple, l'analyse métallographique). L'optimisation de la porosité peut améliorer considérablement les performances du carbure cimenté, prolonger la durée de vie de l'outil (de 20 à 50 %) et améliorer la fiabilité. Voici une analyse détaillée des types de porosité, des mécanismes de formation, des stratégies d'optimisation et des perspectives d'amélioration technique.

#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

## 2. Types de porosité

La porosité du carbure cimenté est classée dans les types suivants selon la taille, la morphologie et l'origine, sur la base des classifications ISO 4505 et ASTM B276 :

### 2.1 Pores de type A (micropores)

Caractéristiques : Diamètre  $< 10 \mu\text{m}$ , rond ou presque rond, uniformément réparti.

Teneur : Fraction volumique 0,01–0,5 %, généralement trouvée dans le carbure cimenté haute densité (densité théorique  $> 99,5 \%$ ).

Impact : Faible effet sur la résistance et la ténacité (réduction  $< 5 \%$ ), mais une teneur élevée peut provoquer des microfissures.

Norme : ISO 4505 A00–A04 (A00 signifie aucune porosité, A04 signifie porosité de 0,2 %).

### 2.2 Pores de type B (pores plus grands)

Caractéristiques : 10–25  $\mu\text{m}$  de diamètre, forme irrégulière, généralement elliptique ou polygonale.

Teneur : Fraction volumique 0,1–1 %, généralement trouvée dans les carbures cimentés de densité moyenne et faible (densité théorique de 98–99 %).

Impact : Résistance réduite (10–20 %) et ténacité ( $K_{Ic}$  diminue de 15 %), usure accrue (ASTM G65 augmente de 20–30  $\text{mm}^3$ ).

Norme : ISO 4505 B00–B08 (B 08 correspond à une porosité de 1 %).

### 2.3 Pores de type C (pores à défauts de carbure)

Caractéristiques : Diamètre  $> 25 \mu\text{m}$ , généralement formé par agglomération ou détachement de particules de carbure (WC, TiC), de forme irrégulière.

Teneur : Fraction volumique 0,05–0,5 %, principalement présente dans le carbure cimenté de faible qualité.

Impact : Réduction significative de la résistance (20 à 30 %) et de la résistance à l'usure (augmentation de l'usure de 30 à 50  $\text{mm}^3$ ) et risque accru de fracture.

Norme : Défaut de type C ASTM B276, nécessite un contrôle strict.

### 2.4 Pores de gaz

Caractéristiques : 10 à 100  $\mu\text{m}$  de diamètre, rond ou sphérique, formé par capture de gaz lors du frittage.

Teneur : 0,01 à 0,2 % en volume, généralement présente dans les matériaux insuffisamment frittés sous vide.

Effet : Densité réduite (0,1–0,3  $\text{g/cm}^3$ ) et résistance aux chocs (ténacité aux chocs réduite de 20 %).

Norme : La norme ISO 4505 est classée comme type A/B, qui doit être distingué par observation métallographique.

#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

### 3. Mécanisme de formation de la porosité

La formation de porosité est étroitement liée aux matières premières, au moulage et au frittage de la métallurgie des poudres. Les principaux mécanismes sont les suivants :

#### 3.1 Défauts des matières premières

Mécanisme : Hétérogénéité des particules : la poudre de WC ou de Co présente une large distribution granulométrique (0,5–10  $\mu\text{m}$ ) et une faible **densité de tassement** (< 60 %), formant des pores de type A/B.

Contamination par impuretés : l'oxygène ( $O > 0,1\%$ ), le soufre ( $S > 0,02\%$ ) ou la matière organique dans les matières premières se volatilisent, libèrent du gaz lors du frittage et forment des pores.

Déséquilibre de la teneur en carbone : un carbone insuffisant ( $C/W < 0,98$ ) conduit à la précipitation de la phase  $\eta$  ( $W_3Co_3C$ ) accompagnée de pores de type C ; un excès de carbone ( $C/W > 1,02$ ) forme du carbone libre et augmente les pores de type B.

Impact : la porosité augmente de 0,2 à 0,5 %, la densité diminue de 0,2  $\text{g}/\text{cm}^3$ , la résistance diminue de 10 à 15 %.

#### 3.2 Défauts de moulage

Mécanisme : Pressage irrégulier : Une pression de pressage insuffisante (< 200 MPa) ou des défauts de conception du moule entraînent une densité irrégulière du corps vert (écart  $\pm 5\%$ ), formant des pores de type B.

Résidus de lubrifiant : les additifs (tels que la paraffine) ne sont pas complètement volatilisés et se décomposent en gaz lors du frittage, formant des pores (diamètre 10–50  $\mu\text{m}$ ).

Impact : la porosité augmente de 0,1 à 0,3 %, la ténacité diminue de 10 % et la qualité de la surface se détériore.

#### 3.3 Défauts de frittage

Mécanisme : Frittage en phase liquide insuffisant : Température de frittage insuffisante (1 350 à 1 450  $^{\circ}\text{C}$ ) ou durée (1 à 2 heures), flux de phase liquide de Co insuffisant et pores résiduels de type A/B (0,1 à 0,5 %).

Capture de gaz : Lorsque le degré de vide est faible ( $< 10^{-2}$  Pa) ou que l'atmosphère de frittage contient de l'oxygène/azote, le gaz est encapsulé par la phase liquide Co pour former des pores.

Agglomération de WC : Sous haute température, les particules de WC croissent anormalement ( $> 5 \mu\text{m}$ ) ou s'agglomèrent, provoquant des pores de type C, accompagnés d'une diminution de 20 % de la résistance.

Impact : la porosité augmente de 0,2 à 1 %, la résistance à l'usure diminue (le volume d'usure augmente de 20 à 40  $\text{mm}^3$ , ASTM G65).

### 4. Méthode d'optimisation de la porosité

#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

L'optimisation de la porosité nécessite de prendre en compte l'ensemble de la chaîne : matières premières, moulage, frittage et post-traitement. Voici les principales méthodes, associées aux cas des fabricants :

#### 4.1 Optimisation des matières premières

Méthode : Contrôle de la taille des particules : Utiliser de la poudre WC nano/submicronique (taille des particules 0,2–0,8  $\mu\text{m}$ ), augmenter la densité de tassement ( $> 65\%$ ) et réduire les pores de type A/B de 0,1–0,2 %.

Matières premières de haute pureté : contrôle de la teneur en oxygène ( $< 0,05\%$ ), de la teneur en soufre ( $< 0,01\%$ ), réduction de la formation de pores et réduction de la porosité à  $< 0,1\%$ .

Rapport carbone précis : C/W est contrôlé à 0,98–1,02 pour éviter la phase  $\eta$  ou le carbone libre et éliminer les pores de type C.

Cas : La nuance Zhuzhou Diamond YG6 utilise de la poudre nano WC (0,4  $\mu\text{m}$ ), la porosité est réduite à A02 (0,05 %) et la résistance est augmentée de 15 %.

#### 4.2 Optimisation de la formation

Méthode : Formage à haute pression : Augmentez la pression de pressage (300 à 500 MPa), la densité du corps vert atteint 70 à 75 % et la porosité de type B est réduite de 0,1 à 0,2 %.

Optimiser les lubrifiants : utiliser des additifs peu volatils (tels que le polyéthylène glycol) et contrôler la quantité ajoutée ( $< 1\%$ ) pour réduire la formation de pores.

Conception de matrice uniforme : en utilisant le pressage isostatique (CIP, 200–300 MPa), l'écart de densité du corps vert est  $< 2\%$  et la porosité est réduite à  $< 0,1\%$ .

Cas : Sandvik utilise la technologie CIP pour réduire la porosité du corps vert YG8 à A00 ( $< 0,01\%$ ) et améliorer la ténacité de 20 %.

#### 4.3 Optimisation du frittage

Méthode : Frittage sous vide/atmosphère : Augmenter le niveau de vide ( $< 10^{-3}$  Pa) ou utiliser une atmosphère d'hydrogène/argon pour réduire les pores (réduction de la porosité de 0,05 à 0,1 %).

Pressage isostatique à chaud (HIP) : 150–200 MPa, 1300–1400  $^{\circ}\text{C}$  sont appliqués après le frittage pour éliminer les pores de type A/B, réduire la porosité à  $< 0,02\%$  et atteindre une densité de 99,9 % de la valeur théorique.

Contrôle précis de la température : la température de frittage est contrôlée à  $\pm 10^{\circ}\text{C}$  et le temps est prolongé de 2 à 3 heures pour favoriser l'écoulement de la phase liquide Co et réduire les pores de type C.

Cas : Les plaquettes Kennametal K313 ont passé le HIP, la porosité a été réduite à A00, la résistance à l'usure a été augmentée de 30 % (usure ASTM G65  $< 10\text{ mm}^3$ ).

#### 4.4 Optimisation du post-traitement

##### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

Méthode : Meulage/polissage de surface : Éliminer les pores de surface (profondeur < 0,1 mm), améliorer la dureté de surface (augmentation HV de 5 %) et la résistance à la corrosion (perte de poids au brouillard salin < 0,1 mg/cm<sup>2</sup>).

Technologie de revêtement : dépôt PVD/CVD de TiN, Le TiAlN (épaisseur 2-5 µm) recouvre les pores de surface, réduit le coefficient de frottement à < 0,3 et prolonge la durée de vie de 2 à 3 fois.

Cas : Les outils Ceratizit CTF sont revêtus de TiAlN, ce qui réduit l'impact de la porosité de surface de 50 % et prolonge la durée de vie de coupe de 40 %.

## 5. Perspectives d'amélioration technologique

Afin de réduire davantage la porosité et d'améliorer les performances du carbure cémenté, les améliorations technologiques suivantes devraient favoriser les applications industrielles en 2026-2028 :

### Poudre nano ultrafine

Poudre WC/Co < 0,2 µm développée avec une densité de tassement de 70 %, une porosité réduite à < 0,01 % et une dureté augmentée à HV1800, adaptée aux outils de haute précision.

### Processus optimisé par l'IA

-4 Pa) grâce à l'apprentissage automatique, la précision du contrôle de la porosité est améliorée de 50 %, éliminant les pores de type C et les trous d'air.

### Frittage par micro-ondes

Le chauffage par micro-ondes (1350–1450 °C) a été utilisé pour raccourcir le temps de frittage (< 1 heure), réduire l'agglomération du WC, réduire la porosité de type C de 0,1 % et améliorer l'efficacité de la production de 30 %.

### Moulage sans lubrifiant

Technologie de pressage à sec développée pour éliminer les pores du lubrifiant et réduire la porosité du corps à < 0,005 %, adaptée aux outils de coupe haut de gamme.

### Préformes d'impression 3D

La technologie d'impression 3D métal est utilisée pour contrôler la structure brute, avec un écart de densité < 1 % et une porosité réduite de 0,1 %, répondant aux besoins des pièces de forme complexe.

### Revêtement nano

TiSiN < 1 µm qui couvre les pores minuscules (< 5 µm), réduit le coefficient de frottement à < 0,2 et prolonge la durée de vie de l'outil de 4 fois.

### Modification de surface au laser

Fusion laser de la surface (profondeur 0,05 mm), éliminant les pores de surface, augmentant la

#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

dureté de 10 % et améliorant la résistance à la corrosion de 30 %, ce qui le rend adapté aux pièces médicales et aéronautiques.

### Polissage au plasma

Améliore la finition de surface ( $R_a < 0,01 \mu\text{m}$ ), réduit l'impact de la porosité de surface et augmente la résistance à la corrosion de 30 %, ce qui le rend adapté aux applications à haute fiabilité.

Ces technologies permettront d'atteindre une porosité de niveau A00 ( $< 0,01 \%$ ) en contrôlant avec précision la microstructure et les paramètres du processus, ce qui permettra des avancées en matière de performances du carbure cémenté dans les pièces de découpe, d'exploitation minière et résistantes à l'usure de haute précision.

## 6. Comparaison des types de porosité et des mesures d'optimisation

Le tableau compare les types, les mécanismes de formation et les mesures d'optimisation de la porosité du carbure cémenté sur la base des normes ISO 4505 et ASTM B276.

Type de pores	Caractéristique	Porosité Taux%	Mécanisme de formation	Impact sur les performances	Mesures d'optimisation	Effets d'application typiques
Pores de type A	Diamètre rond <10,0	0,01–0,5	Les particules ne sont pas densément compactées et le frittage en phase liquide est insuffisant	Réduction de la résistance < 5 %, risque de microfissures	Poudre de WC nano (0,2–0,8 $\mu\text{m}$ ), HIP (150 MPa)	Zhuzhou Diamond YG6, porosité réduite à A02, résistance augmentée de 15 %
Pores de type B	Diamètre irrégulier 10–25,0	0,1–1	Pressage irrégulier, résidus de lubrifiant	mm <sup>3</sup> d'augmentation de l'usure	CIP haute pression (300 MPa), frittage sous vide (<10 <sup>-3</sup> Pa)	Sandvik YG8, porosité réduite à A00, ténacité augmentée de 20 %
pores de type C	Diamètre > 25,0 agglomération WC	0,05–0,5	Déséquilibre du carbone, croissance anormale du WC	mm <sup>3</sup> d'augmentation de l'usure	C/W précis (0,98–1,02), contrôle de la température ( $\pm 10^\circ\text{C}$ )	Kennametal K313, porosité réduite à A00, résistance à l'usure augmentée de 30%
Pores	Diamètre sphérique 10–100,0	0,01–0,2	Capture de gaz, atmosphère impure	Densité réduite de 0,1 à 0,3 g/cm <sup>3</sup> , résistance aux chocs réduite de 20 %	Matières premières de haute pureté (O<0,05%), frittage d'hydrogène	Ceratizit CTF, porosité réduite à < 0,01 %, durée de vie prolongée de 40 %

illustrer:

Caractéristiques : Décrit la taille, la forme et la distribution des pores.

Porosité : Plage de fraction volumique, basée sur une analyse métallographique (ISO 4505).

Impact sur les performances : quantifier l'impact sur la résistance, la ténacité et la résistance à l'usure (ASTM G65).

### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

Mesures d'optimisation : Proposer des améliorations au niveau des matières premières, du moulage, du frittage et du post-traitement en fonction des causes.

Effets d'application typiques : répertorie les cas des fabricants et les données d'amélioration des performances.

## 7. Conclusion

La porosité du carbure cimenté est un défaut majeur qui affecte les performances. Elle se divise en types A (micropores), B (pores plus larges), C (pores défectueux du carbure) et pores, causés respectivement par des défauts de matière première, un moulage irrégulier et un frittage insuffisant. La porosité réduit la résistance (10 à 30 %), la ténacité et la résistance à l'usure (le volume d'usure augmente de 20 à 50 mm<sup>3</sup>). L'optimisation des matières premières (nano WC, haute pureté), du moulage (CIP haute pression), du frittage (CIC, vide) et du post-traitement (revêtement) permet de maintenir la porosité à < 0,05 %, améliorant ainsi considérablement les performances.

Les futures avancées technologiques, telles que les nanopoudres ultrafines, les procédés optimisés par l'IA, le frittage par micro-ondes et les nanorevêtements, réduiront la porosité à < 0,01 %, augmenteront la dureté à HV1800 et multiplieront par quatre la durée de vie des outils. Ces technologies favoriseront l'utilisation du carbure cimenté dans la découpe de haute précision, l'exploitation minière et les pièces résistantes à l'usure. Les fabricants doivent privilégier le CIC et les technologies de contrôle précis de la température pour atteindre une qualité de niveau A00, tout en explorant le préformage par impression 3D et le moulage sans lubrifiant pour répondre à des besoins complexes.

### 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](mailto:sales@chinatungsten.com)

**Tel :** +86 592 5129696

**Official website :** [www.ctia.com.cn](http://www.ctia.com.cn)

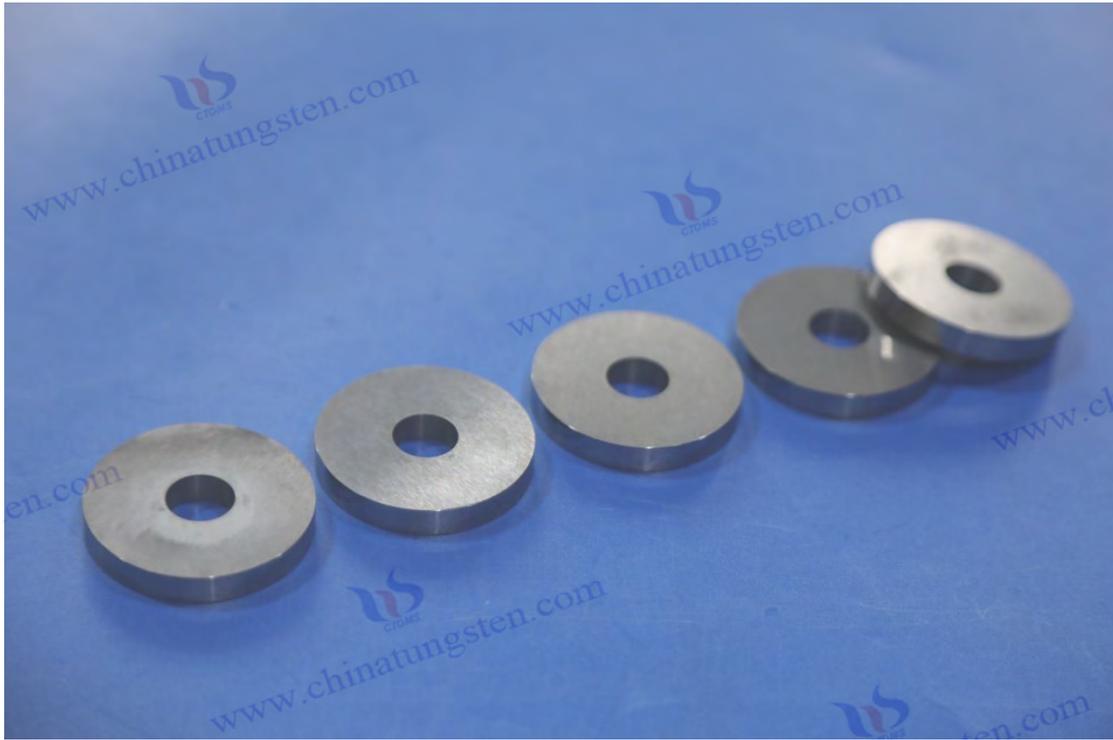
**WeChat :** Follow "China Tungsten Online"



### 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](http://www.ctia.com.cn)

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



appendice:

GB/T 3488.1-2019

Évaluation de la microstructure du carbure cémenté

Partie 1 : Porosité et carbone libre

## 1. Champ d'application

Cette norme spécifie la méthode d'évaluation microscopique de la porosité et du carbone non combiné dans le carbure cémenté, et s'applique à :

Le carbure cémenté à base de carbure de tungstène (WC), contenant une phase liante de cobalt (Co), de nickel (Ni) ou de fer (Fe), peut être ajouté avec du carbure de titane (TiC), du carbure de tantalum (TaC), du carbure de niobium (NbC).

Carbure cémenté produit par procédé de métallurgie des poudres, y compris le frittage, le pressage isostatique à chaud (HIP) et les produits de revêtement.

Applications telles que les outils de coupe, les pics miniers, les matrices, les pièces d'usure, etc.

Il ne convient pas aux matériaux en carbure cémenté non à base de WC ni aux matériaux issus de la métallurgie des poudres.

## 2. Définitions

Carbure cémenté : Matériau composite avec WC comme phase dure principale et Co/Ni/Fe comme phase de liaison.

Porosité : Les pores ou les espaces d'air à l'intérieur d'un matériau, exprimés en fraction volumique.

Carbone non lié : carbone libre (C) ou phase  $\eta$  causée par une carence en carbone ( $W_3Co_3C$ ).

### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

W6Co6C).

Évaluation métallographique : Observer la surface polie de l'échantillon au microscope et compter la distribution et la teneur en pores et en carbone non lié.

### 3. Classification de la porosité et du carbone non lié

#### 3.1 Porosité

##### Pores de type A :

Diamètre <10µm, rond ou presque rond, uniformément réparti.

Source : Les particules ne sont pas densément emballées et le frittage en phase liquide est insuffisant.

##### Pores de type B :

Le diamètre est de 10 à 25 µm et la forme est irrégulière (par exemple, elliptique, polygonale).

Source : pressage irrégulier et évaporation des résidus de lubrifiant.

Stomates : 10–100 µm de diamètre, ronds ou sphériques.

Source : Captation de gaz lors du frittage (oxygène, azote ou volatils).

#### 3.2 Carbone non lié et phase η

##### Défauts de type C (carbone non lié) :

Particules de carbone libre (C), taille > 25 µm , noires et irrégulières.

Source : Excès de carbone lors du frittage (C/W>1,02).

**Phase η** : composé carbure-cobalt (W3Co3C ou W6Co6C), taille > 25 µm, blanc grisâtre.

Source : Carbone insuffisant lors du frittage (C/W<0,98).

### 4. Méthode de notation

La porosité et le carbone libre sont classés par fraction volumique et en trois catégories : A, B et C, chacune allant de 00 (aucun défaut) à 08 (teneur en défauts la plus élevée). La porosité est classée séparément.

#### 4.1 Pores de type A

Fraction volumique : 0–0,2 %, diamètre < 10 µm .

Notation :

A00 : Pas de pores visibles (<0,01%).

A02 : 0,02 %.

A04 : 0,05 %.

A06 : 0,1 %.

A08 : 0,2 %.

Évaluation : Surface des pores par millimètre carré.

#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

#### 4.2 Pores de type B

Fraction volumique : 0–0,2 %, diamètre 10–25  $\mu\text{m}$  .

Notation :

B00 : Pas de pores visibles (<0,01%).

B02 : 0,02 %.

B04 : 0,05 %.

B 06 : 0,1 %.

B08 : 0,2 %.

Évaluation : Surface des pores par millimètre carré.

#### 4.3 Défauts de type C (carbone non lié/phase $\eta$ )

Fraction volumique : 0–0,2 %, taille > 25  $\mu\text{m}$  .

Notation :

C00 : Pas de carbone non lié ni de phase  $\eta$  (< 0,01 %).

C02 : 0,02 %.

C04 : 0,05 %.

C06 : 0,1 %.

C08 : 0,2 %.

Évaluation : Rapport de surface de défaut par millimètre carré, en distinguant le carbone libre (noir) et la phase  $\eta$  (gris blanc).

#### 4.4 Pores

Fraction volumique : 0–0,2 %, diamètre 10–100  $\mu\text{m}$  .

Notation :

G00 : Pas de pores visibles (<0,01%).

G02 : 0,02 %.

G04 : 0,05 %.

G06 : 0,1 %.

G08 : 0,2 %.

Évaluation : Pourcentage de surface de pores par millimètre carré.

#### 4.5 Exigences de classification

Fraction volumique : La zone des pores/défauts est comptée au microscope métallographique avec une précision de  $\pm 0,01$  %.

Zone d'observation : au moins 1  $\text{mm}^2$  , 5  $\text{mm}^2$  recommandés.

Stomates : des pores sphériques de 10 à 100  $\mu\text{m}$  ont été enregistrés individuellement.

### 5. Méthodes d'essai

#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

## 5.1 Préparation des échantillons

Découpe : Découper les échantillons (dimensions 10 × 10 mm) en évitant les fissures.

Montage : Fixation de l'échantillon avec de la résine.

polissage:

Du papier de verre diamanté (granulométrie 5–1  $\mu\text{m}$ ) a été utilisé pour le meulage par étapes.

Polissage jusqu'à rugosité de surface  $R_a < 0,1 \mu\text{m}$  sans rayures.

Évitez d'endommager les pores en polissant trop.

Nettoyage : Nettoyage à l'éthanol ou aux ultrasons pour éliminer les contaminants.

## 5.2 Observation microscopique

Équipement : Microscope optique, grossissement 100–1000x, résolution  $< 0,5 \mu\text{m}$ .

Source de lumière : éclairage en champ clair, ajustez le contraste pour distinguer :

Porosité : Noire.

Carbone non lié : noir.

Phase  $\eta$  : blanc grisâtre.

Matrice WC/Co : blanc/gris.

Zone d'observation : Sélectionner aléatoirement au moins 5 champs de vision (surface totale  $> 1 \text{mm}^2$ ).

Enregistrer:

Pores de type A : Compter la surface des pores  $< 10 \mu\text{m}$ .

Pores de type B : comptez la zone des pores de 10 à 25  $\mu\text{m}$ .

Défauts de type C : distinguer le carbone libre et la phase  $\eta$ , enregistrer la zone de défaut  $> 25 \mu\text{m}$ .

Pores : La zone des pores sphériques d'une taille de 10 à 100  $\mu\text{m}$  a été enregistrée.

## 5.3 Analyse des données

Analyse d'image : utiliser un logiciel d'analyse d'image pour calculer le rapport surface pores/défauts (précision  $\pm 0,01 \%$ ).

Analyse manuelle : comptez la zone des pores/défauts à travers la grille de l'oculaire du microscope pour faciliter l'évaluation.

Notation : Les notes sont déterminées selon A00–A08, B00–B08, C00–C08, G00–G08.

## 5.4 Conditions d'essai

Erreur de porosité :  $< 0,01 \%$ .

Erreur de défaut de type C :  $< 0,01 \%$ .

Environnement : Température  $20 \pm 5^\circ\text{C}$ , humidité  $< 60\%$ , pas de vibration.

Opérateur : Formation en analyse microscopique requise.

### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

## 6. Conditions d'acceptation

### 6.1 Outils de coupe

Exigences : A02/B00/C00/G00 (porosité < 0,02 %, pas de pores de type B, défauts et pores de type C).

### 6.2 Choix miniers

Exigences : A04/B04/C00/G04 (porosité < 0,1 %, pas de défauts de type C, traces de pores).

### 6.3 Moisissure

Exigences : A04/B04/C00/G04 (porosité < 0,1 %, pas de défauts de type C, traces de pores).

### 6.4 Pièces résistantes à l'usure

Exigences : A06/B06/C02/G06 (porosité < 0,2 %, carbone et pores sans traces).

## 7. Résumé des points clés de la norme

éléments	Teneur en $\mu\text{m}$	Classification	Notation	Méthode d'essai	Conditions d'acceptation
Porosité	Type A (<10), Type B (10–25), Stomatique (10–10)	Type A, Type B, pores	A00 à A08 (0 à 0,2 %), B00 à B08 (0 à 0,2 %), G00 à G08 (0 à 0,2 %)	Microscope métallographique (100–1000 fois), analyse d'image (précision $\pm 0,01$ %)	Outil : A02/B00/G00 ; Pioche/Moule : A04/B04/G04
Phase carbone/ $\eta$ non liée	Type C Carbone libre ou phase $\eta$ , >25	Type C	C00–C08 (0–0,2 %)	Observation métallographique, distinction entre carbone libre / noir et phase $\eta$ / blanc gris	Outil/pioche/matrice : C00 ; pièces résistantes à l'usure : C02
Exigences en matière de tests	Échantillon poli ( $R_a < 0,1$ ), zone d'observation >1 mm <sup>2</sup>	Type A/B/C, trou d'aération	Fraction volumique	Résolution du microscope < 0,5 $\mu\text{m}$ , environnement $20 \pm 5$ °C	Erreur de porosité/défaut de type C < 0,01 %

### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

**appendice:**

**ASTM B276-05 (2021) Méthode d'essai pour la porosité du carbure cimenté**

**1. Champ d'application**

Cette norme spécifie la méthode d'essai de la porosité et des micro-défauts dans le carbure cimenté et s'applique à :

Le carbure cimenté à base de carbure de tungstène (WC), contenant une phase liante de cobalt (Co), de nickel (Ni) ou de fer (Fe), peut être ajouté avec du carbure de titane (TiC), du carbure de tantale (TaC), du carbure de niobium (NbC).

Carbure cimenté produit par procédé de métallurgie des poudres, y compris le frittage, le pressage isostatique à chaud (HIP) et les produits de revêtement.

Applications telles que les outils de coupe, les pics miniers, les matrices, les pièces d'usure, etc.

Il ne convient pas aux matériaux en carbure cimenté non à base de WC ni aux matériaux issus de la métallurgie des poudres.

**2. Définitions**

Carbure cimenté : Matériau composite avec WC comme phase dure principale et Co/Ni/Fe comme phase de liaison.

Porosité : Les trous ou les espaces d'air à l'intérieur d'un matériau, exprimés en fraction volumique ou en nombre de pores par unité de surface.

Micro défauts : pores, carbone non combiné ou phase  $\eta$  ( $W_3Co_3C$ ,  $W_6Co_6C$ ).

Analyse métallographique : Observer la surface polie de l'échantillon au microscope et compter la distribution et le contenu des pores et des défauts.

Mesure de la densité : La porosité a été estimée indirectement en mesurant la densité de l'échantillon à l'aide de la méthode d'Archimède.

**3. Classification de la porosité et des défauts microscopiques**

**3.1 Porosité**

**Pores de type A :**

Diamètre  $< 10\mu\text{m}$ , rond ou presque rond, uniformément réparti.

Source : Les particules ne sont pas densément emballées et le frittage en phase liquide est insuffisant.

**Pores de type B :**

Le diamètre est de 10 à 25  $\mu\text{m}$  et la forme est irrégulière (par exemple, elliptique, polygonale).

Source : Pressage inégal et évaporation des résidus de lubrifiant.

**Pores :**

10–100  $\mu\text{m}$  de diamètre, rond ou sphérique.

**COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT**

Source : Captation de gaz lors du frittage (oxygène, azote ou volatils).

### 3.2 Défauts microscopiques

#### Défauts de type C (carbone non lié/phase $\eta$ ) :

Carbone non lié : Particules de carbone libre (C), taille  $> 25 \mu\text{m}$  , noires et de forme irrégulière, provenant d'un excès de carbone ( $C/W > 1,02$ ).

Phase  $\eta$  : composé carbure-cobalt ( $W_3Co_3C$  ou  $W_6Co_6C$ ), taille  $> 25\mu\text{m}$ , blanc grisâtre, issu d'une carence en carbone ( $C/W < 0,98$ ).

### 4. Méthode de notation

La porosité et les défauts microscopiques sont classés par fraction volumique ou nombre de pores/unité de surface en trois catégories : A, B et C, chaque catégorie allant de 1 (teneur en défauts la plus faible) à 5 (teneur en défauts la plus élevée).

#### 4.1 Pores de type A

Fraction volumique : 0–0,5 %, diamètre  $< 10 \mu\text{m}$  .

Notation :

A1 : Fraction volumique  $< 0,01 \%$  ou  $< 5$  pores/ $\text{mm}^2$  .

A2 : Fraction volumique 0,01–0,05 % ou 5–10 pores/  $\text{mm}^2$ .

A3 : Fraction volumique 0,05–0,1 % ou 10–20 pores/ $\text{mm}^2$  .

A4 : Fraction volumique 0,1–0,3 % ou 20–50 pores/ $\text{mm}^2$  .

A5 : Fraction volumique 0,3–0,5 % ou  $> 50$  pores/ $\text{mm}^2$  .

Évaluation : Nombre de pores par millimètre carré ( $< 10 \mu\text{m}$ ) ou pourcentage de surface.

#### 4.2 Pores de type B

Fraction volumique : 0–1 %, diamètre 10–25  $\mu\text{m}$  .

Notation :

B1 : Fraction volumique  $< 0,01 \%$  ou  $< 2$  pores/  $\text{mm}^2$  .

B2 : Fraction volumique 0,01–0,1 % ou 2–5 pores/  $\text{mm}^2$ .

B3 : Fraction volumique 0,1–0,3 % ou 5–10 pores/ $\text{mm}^2$  .

B4 : Fraction volumique 0,3–0,6 % ou 10–20 pores/ $\text{mm}^2$  .

B5 : Fraction volumique 0,6–1,0 % ou  $> 20$  pores/ $\text{mm}^2$  .

Évaluation : Nombre de pores par millimètre carré (10–25  $\mu\text{m}$  ) ou pourcentage de surface.

#### 4.3 Défauts de type C (carbone non lié/phase $\eta$ )

Fraction volumique : 0–0,5 %, taille  $> 25 \mu\text{m}$  .

Notation :

#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

C1 : Fraction volumique < 0,01 % ou aucun défaut visible.

C2 : Fraction volumique 0,01–0,05 % ou < 1 défaut/mm<sup>2</sup> .

C3 : Fraction volumique 0,05–0,1 % ou 1–2 défauts/mm<sup>2</sup> .

C4 : Fraction volumique 0,1–0,3 % ou 2–5 défauts/mm<sup>2</sup> .

C5 : Fraction volumique 0,3–0,5 % ou > 5 défauts/mm<sup>2</sup> .

Évaluation : Rapport de surface de défaut par millimètre carré, en distinguant le carbone libre (noir) et la phase η (gris blanc).

#### 4.4 Exigences de classification

Fraction volumique : La zone des pores/défauts est comptée au microscope métallographique avec une précision de ± 0,01 %.

Zone d'observation : au moins 1 mm<sup>2</sup> , 5 mm<sup>2</sup> recommandés.

Stomates : Les pores sphériques de 10 à 100 μm ont été enregistrés individuellement et classés comme type A/B.

### 5. Méthodes d'essai

#### 5.1 Analyse métallographique

##### 5.1.1 Préparation des échantillons

Découpe : Découper les échantillons (dimensions 10 × 10 mm) en évitant les fissures.

Montage : Fixation de l'échantillon avec de la résine.

polissage:

Du papier de verre diamanté (granulométrie 5–1 μm ) a été utilisé pour le meulage par étapes.

Polissage jusqu'à rugosité de surface Ra<0,05μm, sans rayures.

Évitez d'endommager les pores en polissant trop.

Nettoyage : Nettoyage à l'éthanol ou aux ultrasons pour éliminer les contaminants.

##### 5.1.2 Observation microscopique

Matériel : Microscope optique ou microscope électronique à balayage (MEB), grossissement 200–1500x, résolution < 0,5 μm .

Source de lumière : éclairage en champ clair, ajustez le contraste pour distinguer :

Porosité : Noire.

Carbone non lié : noir.

Phase η : blanc grisâtre.

Matrice WC/Co : blanc/gris.

Zone d'observation : Sélectionner aléatoirement au moins 5 champs de vision (surface totale > 1 mm<sup>2</sup> ) .

Enregistrer:

#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

Pores de type A : compter le nombre ou la surface des pores  $< 10 \mu\text{m}$ .

Pores de type B : comptez le nombre ou la surface des pores d'une taille de 10 à 25  $\mu\text{m}$ .

Défauts de type C : distinguer le carbone libre et la phase  $\eta$ , enregistrer la zone de défaut  $> 25 \mu\text{m}$ .

### 5.1.3 Analyse des données

Analyse manuelle : Comptez le nombre de pores/défauts à travers la grille de l'oculaire du microscope et calculez la fraction volumique ou le nombre/l'unité de surface.

Analyse d'image : utiliser un logiciel d'analyse d'image pour calculer le rapport surface pores/défauts (précision  $\pm 0,01 \%$ ).

Notation : Les notes sont déterminées sur la base de A1–A5, B1–B5 et C1–C5.

### 5.2 Mesure de la densité

Principe : La méthode d'Archimède mesure la densité de l'échantillon et la compare à la densité théorique (12–15,6  $\text{g/cm}^3$  pour WC- Co) pour estimer la porosité.

étape:

Mesurer le poids sec de l'échantillon (précision  $\pm 0,001 \text{ g}$ ) et le poids dans l'eau.

Densité = poids sec / ( poids sec - poids dans l'eau )  $\times$  densité du liquide.

Porosité = (densité théorique - densité mesurée) / densité théorique  $\times 100 \%$ .

Exigences : Précision :  $\pm 0,01 \text{ g/cm}^3$ , répéter la mesure 3 fois et prendre la valeur moyenne.

### 5.3 Conditions d'essai

Erreur de porosité :  $< 0,02 \%$ .

Erreur de défaut de type C :  $< 0,01 \%$ .

Environnement : Température  $23 \pm 2^\circ\text{C}$ , humidité  $< 60\%$ , aucune vibration.

Opérateur : Une formation en analyse métallographique ou en mesure de densité est requise.

## 6. Conditions d'acceptation

### 6.1 Outils de coupe pour l'aviation

Exigences : A1/B1/C1 (porosité  $< 0,01 \%$ , aucun défaut significatif).

### 6.2 Choix miniers

Exigences : A3/B3/C1 (porosité  $< 0,2 \%$ , pas de défauts de type C).

### 6.3 Pièces résistantes à l'usure

Exigences : A4/B4/C2 (porosité  $< 0,6 \%$ , carbone sans trace).

### 6.4 Pièces militaires

Exigences : A1/B1/C1 (porosité  $< 0,01 \%$ , aucun défaut significatif).

#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

## 7. Résumé des points clés de la norme

éléments	contenu	Classification	Notation	Méthode d'essai	Conditions d'acceptation
Porosité	Type A (<10 μm), Type B (10–25 μm), Stomatique (10–100 μm)	Type A Type B	A1–A5 (0–0,5 %), B1–B5 (0–1,0 %)	Microscope métallographique (200–1500x), précision d'analyse d'image ±0,01 % ; mesure de la densité ±0,01 g/cm <sup>3</sup>	Outil d'aviation : A1/B1 ; pic : A3/B3
Défauts microscopiques	Type C (carbone non lié ou phase η, > 25 μm)	Type C	C1–C5 (0–0,5 %)	Observation métallographique, distinction entre le carbone libre (noir) et la phase η (blanc grisâtre)	Aviation/Militaire : C1 ; Pièces résistantes à l'usure : C2
Exigences en matière de tests	Échantillon poli (Ra<0,05μm), zone d'observation>1 mm <sup>2</sup>	Type A/B/C	Fraction volumique ou nombre de pores par unité de surface	Résolution du microscope < 0,5 μm, environnement 23 ± 2 °C	Erreur de porosité < 0,02 %, erreur de défaut de type C < 0,01 %

### 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](mailto:sales@chinatungsten.com)

**Tel :** +86 592 5129696

**Official website :** [www.ctia.com.cn](http://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](http://www.ctia.com.cn)

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

appendice:

## ISO 4505:1978

### Évaluation microscopique de la porosité et du carbone non lié dans le carbure cémenté

#### 1. Champ d'application

Cette norme spécifie la méthode d'évaluation microscopique de la porosité et du carbone non combiné dans le carbure cémenté, et s'applique à :

Le carbure cémenté à base de carbure de tungstène (WC), contenant une phase liante de cobalt (Co), de nickel (Ni) ou de fer (Fe), peut être ajouté avec du carbure de titane (TiC), du carbure de tantale (TaC), du carbure de niobium (NbC).

Carbure cémenté produit par procédé de métallurgie des poudres, y compris le frittage, le pressage isostatique à chaud (HIP) et les produits de revêtement.

Applications telles que les outils de coupe, les pics miniers, les matrices, les pièces d'usure, etc.

Il ne convient pas aux matériaux en carbure cémenté non à base de WC ni aux matériaux issus de la métallurgie des poudres.

#### 2. Définitions

Carbure cémenté : Matériau composite avec WC comme phase dure principale et Co/Ni/Fe comme phase de liaison.

Porosité : Les pores ou les espaces d'air à l'intérieur d'un matériau, exprimés en fraction volumique.

Carbone non lié : carbone libre (C) ou phase  $\eta$  causée par une carence en carbone (W3Co3C, W6Co6C).

Évaluation métallographique : Observer la surface polie de l'échantillon au microscope et compter la distribution et la teneur en pores et en carbone non lié.

#### 3. Classification de la porosité et du carbone non lié

##### 3.1 Porosité

###### Pores de type A :

Diamètre  $< 10\mu\text{m}$ , rond ou presque rond, uniformément réparti.

Source : Les particules ne sont pas densément emballées et le frittage en phase liquide est insuffisant.

###### Pores de type B :

Le diamètre est de 10 à 25  $\mu\text{m}$  et la forme est irrégulière (par exemple, elliptique, polygonale).

Source : pressage irrégulier et évaporation des résidus de lubrifiant.

###### Pores :

Diamètre 10–100  $\mu\text{m}$ , rond ou sphérique, classé type A/B.

Source : Captation de gaz lors du frittage (oxygène, azote ou volatils).

#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

### 3.2 Carbone non lié et phase $\eta$

#### Défauts de type C (carbone non lié) :

Particules de carbone libre (C), taille  $> 25 \mu\text{m}$ , noires et irrégulières.

Source : Excès de carbone lors du frittage ( $C/W > 1,02$ ).

#### phase $\eta$ :

Carbures - composés de cobalt ( $W_3Co_3C$  ou  $W_6Co_6C$ ), taille  $> 25 \mu\text{m}$ , blanc cassé.

Source : Carbone insuffisant lors du frittage ( $C/W < 0,98$ ).

### 4. Méthode de notation

La porosité et le carbone non lié sont classés par fraction volumique ou nombre de pores et sont classés en trois catégories : A, B et C, chaque catégorie allant de 00 (aucun défaut) à 08 (teneur en défauts la plus élevée).

#### 4.1 Pores de type A

Fraction volumique : 0–0,2 %, diamètre  $< 10 \mu\text{m}$ .

Notation :

A00 : Pas de pores visibles ( $< 0,01\%$ ).

A02 : 0,02 %.

A04 : 0,05 %.

A06 : 0,1 %.

A08 : 0,2 %.

Évaluation : Nombre de pores par millimètre carré ( $< 10 \mu\text{m}$ ) ou pourcentage de surface.

#### 4.2 Pores de type B

Fraction volumique : 0–0,2 %, diamètre 10–25  $\mu\text{m}$ .

Notation :

B00 : Pas de pores visibles ( $< 0,01\%$ ).

B02 : 0,02 %.

B04 : 0,05 %.

B06 : 0,1 %.

B08 : 0,2 %.

Évaluation : Nombre de pores par millimètre carré (10–25  $\mu\text{m}$ ) ou pourcentage de surface.

#### 4.3 Défauts de type C (carbone non lié/phase $\eta$ )

Fraction volumique : 0–0,2 %, taille  $> 25 \mu\text{m}$ .

#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

Notation :

C00 : Pas de carbone non lié ni de phase  $\eta$  ( $< 0,01$  %).

C02 : 0,02 %.

C04 : 0,05 %.

C06 : 0,1 %.

C08 : 0,2 %.

Évaluation : Rapport de surface de défaut par millimètre carré, en distinguant le carbone libre (noir) et la phase  $\eta$  (gris blanc).

#### 4.4 Exigences de notation

Fraction volumique : La zone des pores/défauts est comptée au microscope métallographique avec une précision de  $\pm 0,01$  %.

Zone d'observation : au moins  $1 \text{ mm}^2$  ,  $5 \text{ mm}^2$  recommandés.

Pores : Comptés comme de type A/B, les pores sphériques de 10 à 100  $\mu\text{m}$  ont été enregistrés séparément.

### 5. Méthodes d'essai

#### 5.1 Préparation des échantillons

Découpe : Découper les échantillons (dimensions  $10 \times 10 \text{ mm}$ ) en évitant les fissures.

Montage : Fixation de l'échantillon avec de la résine.

polissage:

Du papier de verre diamanté (granulométrie  $5-1 \mu\text{m}$ ) a été utilisé pour le meulage par étapes.

Polissage jusqu'à rugosité de surface  $Ra < 0,1 \mu\text{m}$  sans rayures.

Évitez d'endommager les pores en polissant trop.

Nettoyage : Nettoyage à l'éthanol ou aux ultrasons pour éliminer les contaminants.

#### 5.2 Observation microscopique

Équipement : Microscope optique, grossissement 100–1000x, résolution  $< 0,5 \mu\text{m}$  .

Source de lumière : éclairage en champ clair, ajustez le contraste pour distinguer :

Porosité : Noire.

Carbone non lié : noir.

Phase  $\eta$  : blanc grisâtre.

Matrice WC/Co : blanc/gris.

Zone d'observation : Sélectionner aléatoirement au moins 5 champs de vision (surface totale  $> 1 \text{ mm}^2$ ) .

Enregistrer:

Pores de type A : compter le nombre ou la surface des pores  $< 10 \mu\text{m}$ .

Pores de type B : comptez le nombre ou la surface des pores d'une taille de 10 à 25  $\mu\text{m}$  .

Défauts de type C : distinguer le carbone libre et la phase  $\eta$ , enregistrer la zone de défaut  $> 25 \mu\text{m}$ .

#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

### 5.3 Analyse des données

Analyse manuelle : Comptez le nombre de pores/défauts à travers la grille de l'oculaire du microscope et calculez la fraction volumique.

Analyse d'image : utiliser un logiciel d'analyse d'image pour calculer le rapport surface pores/défauts (précision  $\pm 0,01$  %).

Notation : Les notes sont déterminées sur la base de A00–A08, B00–B08 et C00–C08.

### 5.4 Conditions d'essai

Erreur de porosité :  $< 0,02$  %.

Erreur de défaut de type C :  $< 0,01$  %.

Environnement : Température  $20 \pm 5^\circ\text{C}$ , humidité  $< 60\%$ , pas de vibration.

Opérateur : Formation en analyse microscopique requise.

## 6. Conditions d'acceptation

### 6.1 Outils de coupe

Exigences : A02/B00/C00 (porosité  $< 0,02$  %, pas de pores de type B et de défauts de type C).

### 6.2 Choix miniers

Exigences : A04/B04/C00 (porosité  $< 0,1$  %, pas de défauts de type C).

### 6.3 Pièces résistantes à l'usure

Exigences : A06/B06/C02 (porosité  $< 0,2$  %, carbone sans trace).

### 6.4 Couteaux médicaux

Exigences : A00/B00/C00 (porosité  $< 0,01$  %, aucun défaut).

## 7. Résumé des points clés de la norme

éléments	Contenu ( $\mu\text{m}$ )	Classification	Notation	Méthode d'essai	Conditions d'acceptation
Porosité	Type A ( $< 10$ ), Type B (10–25), Stomatique (10–100)	Type A Type B	A00 à A08 (0 à 0,2 %), B00 à B08 (0 à 0,2 %)	Microscope métallographique (100–1000 fois), analyse d'image (précision $\pm 0,01$ %)	Outil : A02/B00 ; Médiator : A04/B04 ; Médical : A00/B00
Phase carbone/ $\eta$ non liée	Type C (carbone libre ou phase $\eta$ , $> 25$ )	Type C	C00–C08 (0–0,2 %)	Observation métallographique, distinction entre le carbone libre (noir) et la phase $\eta$ (blanc grisâtre)	Outil/dents de coupe : C00 ; pièces d'usure : C02
Exigences en matière de tests	Échantillon poli ( $R_a < 0,1$ ), zone d'observation $> 1 \text{ mm}^2$	Type A/B/C	Fraction volumique ou nombre de pores par unité de surface	Résolution du microscope $< 0,5 \mu\text{m}$ , environnement $20 \pm 5^\circ\text{C}$	Erreur de porosité $< 0,02$ %, erreur de défaut de type C $< 0,01$ %

#### 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](mailto:sales@chinatungsten.com)

**Tel :** +86 592 5129696

**Official website :** [www.ctia.com.cn](http://www.ctia.com.cn)

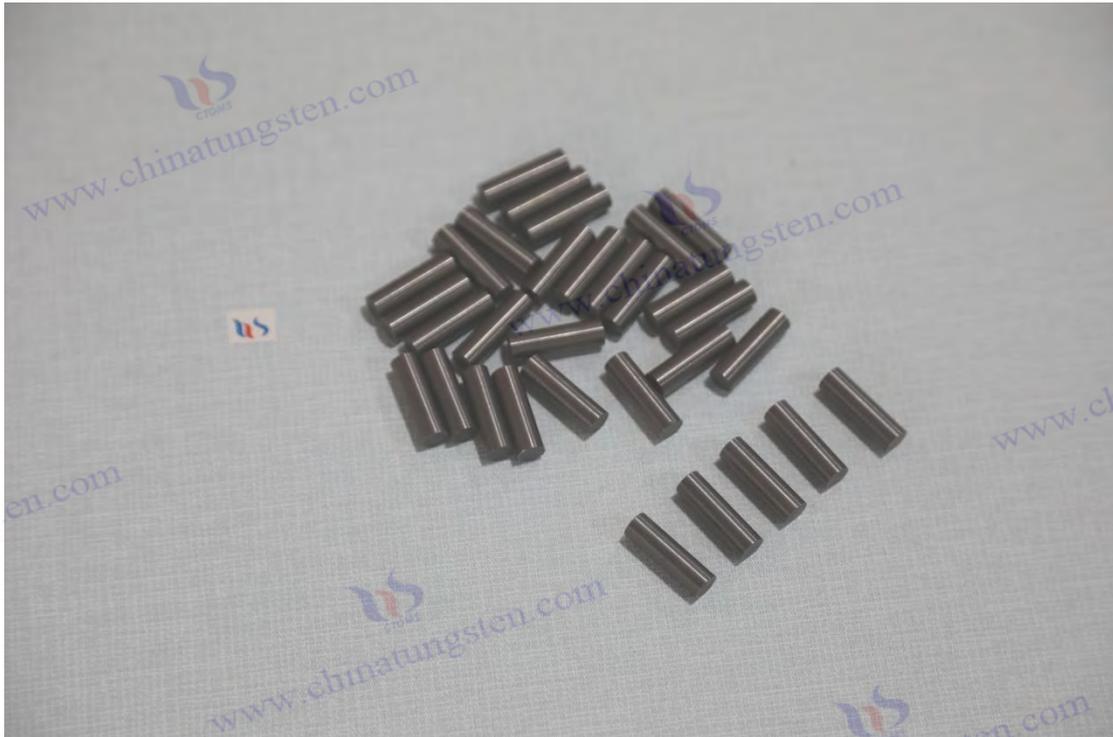
**WeChat :** Follow "China Tungsten Online"



### 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](http://www.ctia.com.cn)

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



## appendice:

### Effets et comparaison des carbures auxiliaires en carbure cémenté ( TiC , TaC , NbC )

#### 1. Aperçu du carbure cémenté et des carbures auxiliaires

Le carbure cémenté est un matériau composite dont la phase dure principale est le carbure de tungstène (WC) et la phase liante est le cobalt (Co) ou le nickel (Ni). Fabriqué par métallurgie des poudres, il présente une dureté élevée (HV1000-1800) et une excellente résistance à l'usure. Il est largement utilisé dans les outils de coupe, les pics miniers et les pièces résistantes à l'usure. Afin d'optimiser ses performances, le carbure cémenté est souvent additionné de carbures auxiliaires, tels que le carbure de titane ( TiC ), le carbure de tantale ( TaC ) et le carbure de niobium ( NbC ), dont la teneur en carbure est généralement de 5 à 20 % (fraction massique). Ces carbures auxiliaires élargissent le champ d'application du carbure cémenté en améliorant la dureté, la résistance à l'usure, la dureté rouge et la résistance à l'oxydation.

Le rôle des carbures auxiliaires dépend de leurs propriétés physiques et chimiques (telles que la dureté, le point de fusion, la structure cristalline) et de l'effet synergique avec le WC et la phase liante. TiC , Le TaC et le NbC sont des carbures cubiques présentant une dureté élevée (HV2000-3000) et une meilleure stabilité thermique que le WC (système hexagonal, HV1500-2000 ). Ils améliorent les performances du carbure cémenté grâce à un mécanisme de renforcement en solution solide ou particulaire. Voici une analyse détaillée du rôle de chaque carbure auxiliaire et une comparaison de leurs caractéristiques à l'aide d'un tableau.

#### 2. Le rôle des carbures auxiliaires

##### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

## 2.1 Carbure de titane ( TiC )

### Le rôle des carbures auxiliaires

#### Améliorer la dureté

Le TiC présente une dureté supérieure (HV 2800–3200) à celle du WC. Un ajout de 5 à 15 % peut augmenter la dureté du carbure cémenté jusqu'à HV 1400–1600, ce qui le rend adapté à l'usinage de matériaux très durs (comme l'acier trempé, HV 600–800).

#### Résistance à l'usure améliorée

de TiC (1 à 5  $\mu\text{m}$ ) sont petites et uniformes, ce qui réduit l'usure (10 à 20  $\text{mm}^3$  dans le test ASTM G65) et prolonge la durée de vie de l'outil.

#### Propriétés antioxydantes améliorées

Le TiC forme une couche protectrice de  $\text{TiO}_2$  à haute température ( $> 800\text{ }^\circ\text{C}$ ), ce qui retarde l'usure par oxydation et convient à la découpe à grande vitesse.

Réduction de la densité : la densité du TiC ( $4,9\text{ g/cm}^3$ ) est bien inférieure à celle du WC ( $15,6\text{ g/cm}^3$ ), ce qui réduit le poids du carbure cémenté (réduit de 10 à 15 %) et convient aux composants aérospatiaux légers.

### Limitations des carbures auxiliaires

Ténacité diminuée : lorsque l'ajout de TiC est  $> 15\%$ , la ténacité à la rupture ( $K_{1c}$ ) chute à 8–10  $\text{MPa}\cdot\text{m}^{1/2}$ , ce qui le rend sujet à une fracture fragile.

Coût plus élevé : le prix du TiC est plus élevé que celui du WC, ce qui augmente le coût de production.

Applications : Le TiC est couramment utilisé dans les outils de coupe à grande vitesse (tels que Kennametal K313), les revêtements résistants à l'usure et les composants aérospatiaux.

## 2.2 Carbure de tantale ( TaC )

### Le rôle du carbure de tantale ( TaC )

Amélioration de la dureté rouge : le TaC a un point de fusion plus élevé ( $3\ 880\text{ }^\circ\text{C}$ ) que le WC ( $2\ 870\text{ }^\circ\text{C}$ ). Un ajout de 3 à 10 % permet de maintenir la dureté du carbure cémenté à  $1\ 000\text{ }^\circ\text{C}$  (HV 1 200–1 400), ce qui le rend adapté à l'usinage à haute température (comme l'acier inoxydable et les alliages à base de nickel).

Résistance améliorée aux chocs thermiques : le TaC réduit le coefficient de dilatation thermique ( $6,3\times 10^{-6}/\text{K}$  contre WC  $5,2\times 10^{-6}/\text{K}$ ), réduit les fissures thermiques et convient à la coupe intermittente.

Anti-adhérence améliorée : le TaC a une faible énergie de surface, ce qui réduit l'adhérence des matériaux de la pièce pendant la coupe, réduit le coefficient de frottement (0,2–0,3) et améliore la qualité de la surface.

### Limites du carbure de tantale ( TaC )

Coûteux : le TaC est beaucoup plus cher que le WC et le TiC, ce qui limite son application à grande

#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

échelle.

Gain de dureté limité : la dureté TaC (HV1800–2000) est inférieure à celle du TiC et l'augmentation de la dureté est faible (environ 5–10 %).

Application : Le TaC est principalement utilisé dans les outils de coupe haut de gamme (tels que les inserts revêtus PVD Sandvik), le traitement des aubes de turbines d'aviation et le forgeage à chaud.

### 2.3 Carbure de niobium ( NbC )

#### Rôle du carbure de niobium ( NbC )

Affinement du grain : le NbC (taille des particules de 0,5 à 2  $\mu\text{m}$ ) inhibe la croissance des grains de WC (contrôlée à 1 à 3  $\mu\text{m}$ ), améliore la résistance du carbure cémenté (résistance à la traction augmentée de 10 à 15 %) et la ténacité ( $K_{1c}$  augmenté à 12 à 15  $\text{MPa}\cdot\text{m}^{1/2}$ ).

Résistance à la corrosion améliorée : le NbC forme une couche protectrice  $\text{Nb}_2\text{O}_5$  dans un environnement acide (pH 2–4), avec une perte de poids au brouillard salin de  $< 0,1 \text{ mg/cm}^2$ , ce qui le rend adapté aux équipements chimiques et à l'ingénierie marine.

Résistance à l'usure abrasive améliorée : le NbC forme une solution solide avec le WC, augmentant la résistance de la limite de phase et réduisant la perte par usure de 15 à 25  $\text{mm}^3$  (ASTM G65).

#### Limites du carbure de niobium ( NbC )

Dureté rouge insuffisante : Bien que le NbC ait un point de fusion élevé ( $3600^\circ\text{C}$ ), son oxydation s'accélère à  $>900^\circ\text{C}$ , limitant ses applications à haute température.

Ressources rares : les réserves de minerai de niobium sont limitées (environ 4,3 millions de tonnes dans le monde, dont 70 % au Brésil) et les prix fluctuent.

Application : Le NbC est couramment utilisé dans les pics miniers, les pièces résistantes à l'usure et les moules résistants à la corrosion (tels que la nuance Zhuzhou Diamond YN8).

### 2.4 Synergie

#### Ajouter une combinaison

TiC , Le TaC et le NbC sont souvent utilisés en combinaison (par exemple, TiC 5 % + TaC 3 % + NbC 2 %) pour améliorer de manière synergique la dureté, la résistance à l'usure et la dureté à chaud. Par exemple, les plaquettes Sandvik GC2030 sont dotées d'un composite TiC-TaC-NbC , avec une dureté HV1500 et une durée de vie prolongée de 30 %.

#### Renforcement des solutions solides

TiC , TaC , Le NbC et le WC forment une solution solide ( W , Ti,Ta , Nb )C , et la distorsion du réseau améliore la dureté et la résistance à la déformation (la limite d'élasticité augmente de 20 %).

#### Structure du gradient

En contrôlant la distribution de TiC / TaC / NbC , un carbure cémenté à gradient avec une dureté de surface élevée et une ténacité élevée au milieu est formé, et la résistance aux chocs est améliorée de 25 %.

#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

### 3. Comparaison des performances des carbures auxiliaires

Le tableau suivant compare les performances et l'application du TiC , TaC et NbC dans le carbure cémenté, sur la base de données de test standard telles que ASTM G65 et ISO 513 :

carbure auxiliaire	Dureté HV	Point de fusion (°C)	densité (g/cm <sup>3</sup> )	Ténacité (K <sub>1c</sub> , MPa·m <sup>1/2</sup> )	Résistance à l'abrasion (ASTM G65, mm <sup>3</sup> )	Dureté rouge (°C)	Résistance à la corrosion (perte de poids due au brouillard salin, mg/cm <sup>2</sup> )	Coût (USD/kg)	Applications typiques
TiC	2800–3200	3160	4.9	8–10	10–20	≤900	0,2–0,3	30–50	Outils de coupe à grande vitesse, pièces aéronautiques
TaC	1800–2000	3880	14.3	10–12	15–25	≤1000	0,1–0,2	100–150	Outils haute température, forgeage à chaud
NbC	2000–2400	3600	7.8	12–15	15–25	≤900	<0,1	50–80	Pics miniers, moules résistants à la corrosion

illustrer:

Paramètres de performance : dureté (dureté Vickers HV), ténacité (ténacité à la rupture K<sub>1c</sub>), résistance à l'usure (perte d'usure ASTM G65), dureté rouge (température de maintien de la dureté à haute température), résistance à la corrosion (perte de poids au test de brouillard salin).

Applications typiques : Basées sur les caractéristiques du TiC, TaC et NbC, listent les principaux scénarios industriels.

Source des données : Référence Sandvik, Kennametal, Zhuzhou Diamond Technology White Paper, normes de test ASTM G65, ISO 513.

### 4. Avantages, inconvénients et principes de sélection des carbures auxiliaires

#### 4.1 Résumé des avantages et des inconvénients

##### TiC

Avantages : Dureté la plus élevée, densité la plus faible, convient à la coupe légère et à grande vitesse, bonne résistance à l'oxydation.

Inconvénients : ténacité inférieure, coût plus élevé que le WC et sujet à la rupture fragile en raison d'une addition élevée.

##### TaC

Avantages : Excellente dureté rouge, forte résistance aux chocs thermiques et à l'adhérence, adapté aux coupes à haute température et intermittentes.

#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

Inconvénients : cher, gain de dureté limité et application limitée par le coût.

## Nb

Avantages : grains raffinés, résistance optimale à la corrosion, bonne ténacité et résistance à l'usure abrasive.

Inconvénients : dureté rouge insuffisante, ressources en niobium rares et fortes fluctuations de prix.

## 4.2 Principes de sélection

### Découpe à grande vitesse (comme l'alliage d'aluminium aéronautique, l'acier trempé)

Le TiC est le premier choix pour améliorer la dureté et la résistance à l'oxydation. Les nuances typiques incluent le K313 (TiC 10 %).

### Traitement à haute température (tels que les alliages à base de nickel, le forgeage à chaud)

Choisissez le TaC pour optimiser la dureté rouge et la résistance aux chocs thermiques. Les nuances typiques incluent le GC2030 (TaC 5 %).

### Environnement minier ou résistant à la corrosion (comme les moules chimiques)

Le NbC est privilégié pour améliorer la ténacité et la résistance à la corrosion. Les nuances courantes incluent le YN8 (3 % de NbC).

### Performance globale

La combinaison TiC-TaC-NbC équilibre la dureté, la ténacité et la dureté rouge, et se retrouve couramment dans les outils haut de gamme et les pièces résistantes à l'usure.

### Scénarios sensibles aux coûts

Contrôlez la quantité d'ajout de TaC et NbC (<5%), concentrez-vous sur TiC et réduisez le coût de 10 à 20 %.

## 5. Tendances du marché et futures

### État du marché

En 2025, le marché du carbure cémenté représentera environ 18 milliards de dollars, les carbures auxiliaires représentant 20 à 30 % du coût de la matière première. Le TiC est le plus utilisé (60 %), tandis que le TaC et le NbC représentent respectivement 15 % et 10 % du coût de la matière première, en raison de contraintes de coût et de ressources.

### Tendances futures

#### Nanocarbone

Le TiC / NbC à l'échelle nanométrique (< 0,5 µm) augmente la dureté à HV1600–1800 et la ténacité de 20 %, et devrait représenter 15 % du marché en 2027.

#### Fabrication verte

Recycler le TiC / TaC / NbC (taux de recyclage > 80%), réduire les coûts de 15% et réduire l'empreinte carbone de 25%.

#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

### Conception intelligente

L'IA optimise les ratios de carbure (erreur < 2 %) et améliore les performances des outils de 30 %. Par exemple, Sandvik lancera la conception d'outils assistée par IA en 2024.

### Applications émergentes

Le TiC / TaC / NbC dans les nouvelles énergies (comme le traitement des pales d'éoliennes), le médical (forets dentaires) et le forage en haute mer (composants résistants à la corrosion) croît de 10 % par an.

## 6. Conclusion

TiC , Le TaC et le NbC présents dans le carbure cémenté ont considérablement élargi le champ d'application des matériaux en améliorant la dureté, la résistance à l'usure, la dureté à chaud, la résistance à l'oxydation et la résistance à la corrosion. Le TiC est adapté à la coupe à grande vitesse grâce à sa dureté élevée et sa faible densité ; le TaC est adapté à l'usinage à haute température grâce à son excellente dureté à chaud et à sa résistance aux chocs thermiques ; et le NbC est supérieur aux industries minière et chimique grâce à ses grains raffinés et à sa résistance à la corrosion. L'ajout combiné et le renforcement par solution solide optimisent encore les performances, mais un équilibre entre coût et performance est nécessaire. À l'avenir, les nanocarburants , la fabrication verte et la conception intelligente favoriseront l'application des carbures auxiliaires dans les industries de haute précision et durables. Lors du choix des carbures auxiliaires, TiC , Le TaC et le NbC doivent être raisonnablement adaptés en fonction des conditions de traitement, des exigences environnementales et des contraintes de coût pour obtenir des performances optimales.

#### 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](mailto:sales@chinatungsten.com)

**Tel :** +86 592 5129696

**Official website :** [www.ctia.com.cn](http://www.ctia.com.cn)

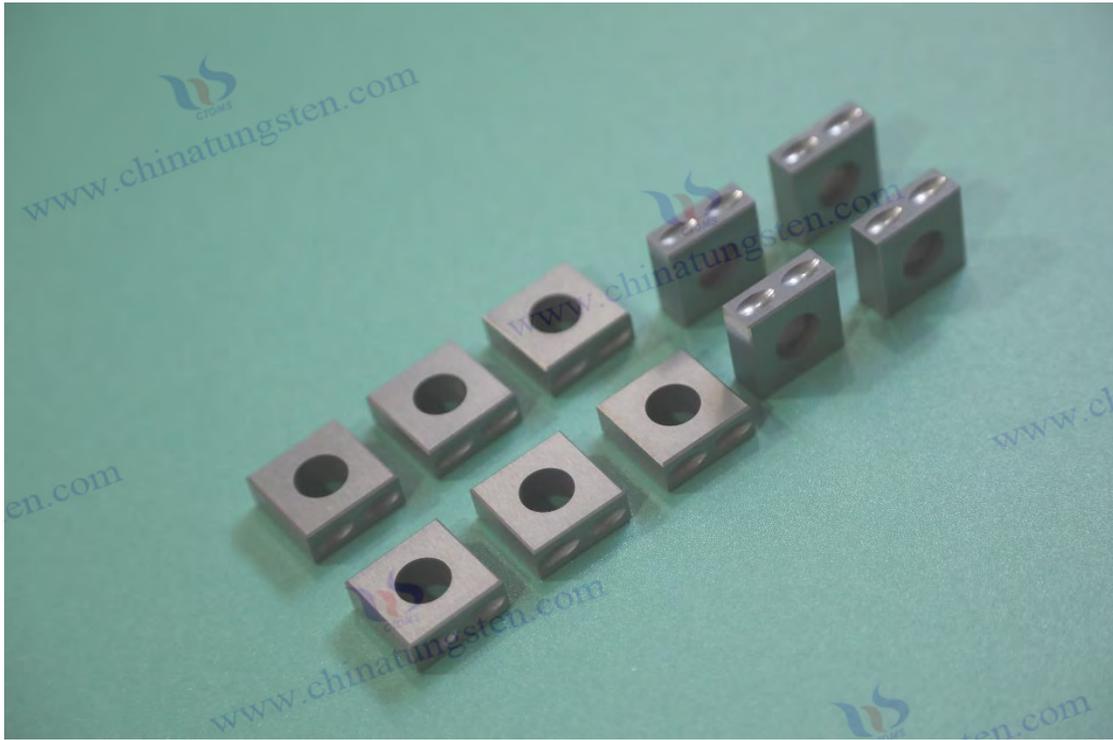
**WeChat :** Follow "China Tungsten Online"



### 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](http://www.ctia.com.cn)

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



appendice:

## Types et fonctions de la phase liante en carbure cimenté

### 1. Aperçu

Grâce à sa dureté élevée (1 400 à 2 200 HV), sa résistance à l'usure et sa résistance à la flexion (1,5 à 2,5 GPa), le carbure cimenté est devenu la pierre angulaire des outils de coupe, des moules et des outils miniers. Ses performances proviennent de la synergie entre la phase dure (comme le WC) et la phase liante. La phase liante agit comme un liant et un ajusteur, reliant les particules de la phase dure, conférant ainsi ténacité, résistance à la corrosion et propriétés de mise en œuvre. Depuis l'invention du carbure cimenté en Allemagne en 1923, la phase liante s'est étendue du cobalt simple au nickel, au fer, aux alliages cobalt-nickel, etc. Ces dernières années, les nanophases liantes, les alliages multi-éléments (comme Co+Mo+ Ni) et l'optimisation des revêtements ont considérablement amélioré les performances. Cet article aborde les types, les fonctions, les microstructures, les comparaisons de nuances, les interactions des revêtements, les mesures d'optimisation et les applications des phases liantes, en lien avec les normes (telles que GB/T 3849 et ISO 4499).

### 2. Type de phase de liaison

#### 2.1 Cobalt (Co)

Caractéristiques : plus de 90 %, teneur 620 %, structure FCC, angle de mouillage < 10°, point de fusion 1495°C.

#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

Propriétés : Dureté 13001500 HV, KIC 812 MPa·m<sup>1/2</sup>, résistance à la flexion 22,5 GPa .

Applications : Outils de coupe (YG6), moules (YG15), exploitation minière (YG8).

Avantages et inconvénients : ténacité élevée, porosité < 0,01 %, mais taux de corrosion de 0,01 mm/an, coût élevé (3 040 \$/kg).

## 2.2 Nickel (Ni)

Caractéristiques : résistance à la corrosion, teneur 515%, angle de mouillage ~15°, point de fusion 1455°C.

Performances : Taux de corrosion < 0,005 mm/an, dureté ~ 1350 HV, KIC 1012 MPa·m<sup>1/2</sup> .

Applications : outils de coupe humide, moules chimiques, outils marins.

Avantages et inconvénients : forte résistance à la corrosion, faible coût (1 520 USD/kg), force de liaison légèrement faible.

## 2.3 Fer (Fe)

Caractéristiques : faible coût, teneur 510 %, angle de mouillage ~ 20°, point de fusion 1538°C, phase η facile à former.

Performances : Dureté ~1300 HV, résistance à la flexion 1,82,2 GPa , taux de corrosion 0,02 mm/an.

Application : Outils miniers à faible coût.

Avantages et inconvénients : 20 % de coût en moins, 10 % de performances en moins.

## 2.4 Alliage cobalt-nickel ( Co + Ni )

Caractéristiques : Combinant la ténacité du cobalt et la résistance à la corrosion du nickel, la teneur est de 615 % et le rapport est réglable.

Performances : Dureté 13501450 HV, Taux de corrosion 0,007 mm/an, KIC 1012 MPa·m<sup>1/2</sup> .

Application : outils aéronautiques, moules chimiques.

Avantages et inconvénients : Excellentes performances globales, mais le ratio doit être optimisé.

## 2.5 Autres (Mo, Cu)

Caractéristiques : Le Mo est résistant à la chaleur (2623°C), le Cu est résistant à la corrosion (1085°C) et la teneur est <5%.

Performances : dureté 12001300 HV, résistance à la flexion 1,52 GPa .

Application : outils haute température (Mo), pièces à faible charge (Cu).

Progrès : la résistance à la chaleur du Co+Mo+Ni a augmenté de 20 %, la ténacité du nano-cobalt a augmenté de 10 %.

## 3. Effet de phase adhésive

### 3.1 Liaison de phase dure

#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

Mécanisme : Frittage en phase liquide, mouillage WC, énergie de liaison  $\sim 2 \text{ J/m}^2$ .

Effet : résistance à la compression 46 GPa, porosité  $< 0,01 \%$ , économie d'énergie 10 %.

### 3.2 Améliorer la ténacité et la résistance

Mécanisme : Déformation plastique, empêchant la propagation des fissures.

Effet : Le cobalt est passé de 6 % à 15 %, le KIC a augmenté de 50 % et la résistance à la flexion a augmenté de 25 %.

### 3.3 Réglage de la dureté

Mécanisme : La dureté de la phase de liaison est faible et une teneur élevée réduit la dureté globale.

Effet : 6 % Co (1500 HV), 15 % Co (1300 HV).

### 3.4 Améliorer la résistance à la corrosion

Mécanisme : Le nickel forme une couche de passivation.

Effet : Taux de corrosion à base de nickel  $< 0,005 \text{ mm/an}$ , 50 % meilleur que le cobalt.

### 3.5 Améliorer les performances de traitement

Mécanisme : La phase liquide favorise la densification.

Effet : Densité à base de cobalt  $> 99,9 \%$ , taux de retrait 1520 %.

### 3.6 Interaction avec les phases dures

Mécanisme : Énergie de liaison du WC cobalt  $\sim 2 \text{ J/m}^2$ , Cr<sub>3</sub>C<sub>2</sub> inhibe la croissance des grains.

Effet : La ténacité du nano-cobalt a été augmentée de 10 %.

## 4. Microstructure de la phase de liaison

### 4.1 Structure cristalline

Cobalt : FCC (haute ductilité) + HCP partiel (haute dureté), le refroidissement rapide conserve le FCC et la ténacité augmente de 10 %.

Nickel : stabilise le FCC, excellente résistance à la corrosion.

Fer : BCC, faible ductilité, phase  $\eta$  facile à former.

SEM/TEM : La phase cobalt est réticulaire ( $0,52 \mu\text{m}$ ) et la phase nickel est relativement fine ( $0,31,5 \mu\text{m}$ ).

### 4.2 Fonctionnalités de l'interface

#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

Cobalt WC : Énergie de liaison  $\sim 2 \text{ J/m}^2$  , résistance à la flexion augmentée de 15 %.

Nickel WC : Énergie de liaison  $\sim 1,5 \text{ J/m}^2$  , résistance réduite de 510 %.

Fer WC : Phase  $\eta$  facile à former, résistance réduite de 1015 %.

Optimisation : Cr3C2 augmente la force de liaison de 10 %.

### 4.3 Caractéristiques de distribution

Répartition uniforme : résistance aux fissures augmentée de 20 %.

Bassin de cobalt : force réduite de 1015 %.

SEM : uniformité YG6 > 95 %, pool de cobalt YG15 510 %.

Optimisation : broyage à billes + Cr3C2, uniformité augmentée de 15%.

### 4.4 Défauts microscopiques

Porosité : Porosité > 0,1 % réduction de la résistance de 20 %.

Phase  $\eta$  : dureté réduite de 510%.

Carbone libre : résistance réduite de 10 %.

TEM : phase  $\eta$  en forme d'aiguille ( $15 \mu\text{m}$ ), en forme d'amas de carbone libre ( $0,52 \mu\text{m}$ ).

Optimisation : la force de la hanche a été augmentée de 15 %.

## 5. Comparaison des marques

Marque	Phase adhésive	contenu	Dureté (HV)	Résistance à la flexion ( GPa )	Ténacité (KIC)	Taux de corrosion (mm/an)	application
YG6	cobalt	6%	1500	2.0	8	0,01	Outils de coupe
YG8	cobalt	8%	1450	2.2	9	0,01	Outils miniers
YG15	cobalt	15%	1300	2,5	12	0,01	matrice d'estampage
YN10	nickel	10%	1350	2.0	10	<0,005	Coupe humide
YNC8	Co+Ni	8%	1400	2.3	11	0,007	Outils d'aviation
YF10	Fer + Cobalt	10%	1300	1.9	8	0,02	Outils à faible coût

## 6. Interaction entre la phase liante et le revêtement

### 6.1 Type de revêtement

TiN : Dureté 20002500 HV, résistant à l'usure.

CrN : Dureté 18002200 HV, résistant à la corrosion.

Al2O3 : Dureté 2000 HV, résistance à la chaleur >1000°C.

Revêtement multicouche : TiN+Al2O3+TiCN, excellentes performances globales.

#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

## 6.2 Mécanisme d'interaction

Liaison d'interface : l'adhérence à base de cobalt + TiN augmente de 20 % et la durée de vie à base de nickel + CrN augmente de 50 %.

Correspondance de dilatation thermique : Cobalt + TiN augmente la stabilité de 15 %.

Stabilité chimique : Taux de corrosion à base de nickel + CrN < 0,003 mm/an.

## 6.3 Effet

Résistance à l'usure : YG6+TiN augmente la durée de vie de 3 fois.

Résistance à la corrosion : YN10+CrN double la durée de vie.

Résistance à la chaleur : température de coupe YNC8+Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> > 1000°C.

## 7. Mesures d'optimisation

Choix de la phase liante : Cobalt (ténacité), Nickel (résistance à la corrosion), Co+Ni (combiné).

Teneur contrôlée : 6% cobalt (couteaux), 15% cobalt (moules).

Répartition améliorée : ténacité Cr<sub>3</sub>C<sub>2</sub> +5%.

Frittage optimisé : résistance HIP +15%.

Revêtement : CrN résistance à la corrosion +2 fois.

## 8. Cas d'application

Outil YG6 : dureté 1500 HV, durée de vie 2 heures (+ TiN 6 heures).

Moule YG15 : résistance à la flexion 2,5 GPa , durée de vie 120 000 fois.

Moule YN10 : taux de corrosion < 0,005 mm/an, durée de vie 1 an (+ CrN 2 ans).

Outil YNC8 : dureté 1400 HV, durée de vie 3 heures (+Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 4 heures).

## 9. Normes

GB/T 3849 : Essai magnétique au cobalt.

ISO 4499 : Microstructure.

ASTM B406 : Résistance à la flexion.

ASTM G31 : Résistance à la corrosion.

ASTM C633 : Adhérence du revêtement.

### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

**appendice:**

**Types et sélection d'applications des liants dans le processus de mélange du carbure cémenté**

**1. Aperçu**

Lors du procédé de mélange du carbure cémenté, la phase dure (WC), la phase liante (Co) et les additifs sont mélangés par broyage humide ou à sec, puis un liant est ajouté pour préparer une suspension homogène destinée au séchage par atomisation, à la granulation et au pressage. Le liant améliore la liaison des particules (résistance à vert > 5 MPa), améliore la fluidité (< 30 s/50 g), contrôle la morphologie des particules (D50 50200  $\mu\text{m}$ ) et se décompose avant frittage (carbone résiduel < 0,1 %). Les liants courants comprennent le polyéthylène glycol (PEG), l'alcool polyvinylique (PVA), la paraffine (PW) et le caoutchouc (SBR/BR). Le choix du liant doit tenir compte des caractéristiques de la suspension, du procédé et de l'application.

**2. Types et caractéristiques des adhésifs**

**2.1 Polyéthylène glycol (PEG)**

Propriétés chimiques :  $\text{HO}(\text{CH}_2\text{CH}_2\text{O})_n\text{H}$ , poids moléculaire 200-20 000, soluble dans l'eau/éthanol, température de décomposition 250-400°C, carbone résiduel <0,05%.

Propriétés physiques : viscosité 100500  $\text{mPa}\cdot\text{s}$ , résistance à l'état vert 510 MPa, fluidité <25 s/50 g.

Avantages : bonne solubilité, décomposition propre, faible coût (1015 yuans/kg).

Inconvénients : Hygroscopique, stabilité de la suspension réduite de 10 %.

Procédé : Ajouter 12 %, remuer pendant 12 heures, décomposer à 300-400°C.

**2.2 Alcool polyvinylique (PVA)**

Propriétés chimiques :  $(\text{C}_2\text{H}_4\text{O})_n$ , poids moléculaire 20 000-200 000, soluble dans l'eau, température de décomposition 200-350 °C, carbone résiduel < 0,1 %.

Propriétés physiques : viscosité 2001000  $\text{mPa}\cdot\text{s}$ , résistance à l'état vert 812 MPa, fluidité <28 s/50 g.

Avantages : Force de liaison élevée, adapté aux formes complexes.

Inconvénients : la solubilité de l'éthanol est faible et le coût de séchage augmente de 10 à 15 %.

Procédé : Ajouter 0,5-1,5 %, remuer pendant 23 heures, décomposer à 250-350°C.

**2.3 Cire de paraffine (PW)**

Propriétés chimiques : hydrocarbures, poids moléculaire 3001000, point de fusion 5070°C, température de décomposition 200500°C, carbone résiduel 0,10,2%.

Propriétés physiques : viscosité 1050  $\text{mPa}\cdot\text{s}$ , résistance à l'état vert 48 MPa, fluidité <30 s/50 g.

Avantages : faible coût (510 yuans/kg), bonne lubrification.

**COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT**

Inconvénients : beaucoup de résidus de carbone, nécessitant un solvant organique.

Procédé : Quantité ajoutée 23 %, chauffage 6080°C, décomposition 400500°C.

## 2.4 Caoutchouc (SBR/BR)

Propriétés chimiques : poids moléculaire 50 000-500 000, température de décomposition 300-600°C, carbone résiduel 0,2-0,3%.

Propriétés physiques : viscosité 500-2000 mPa·s, résistance à l'état vert 610 MPa, fluidité <30 s/50 g.

Avantages : Haute élasticité, résistance aux fissures augmentée de 15 %.

Inconvénients : beaucoup de carbone résiduel et coût élevé (2030 yuans/kg).

Procédé : Quantité ajoutée 12 %, chauffage 5070°C, décomposition 400600°C.

## 2.5 Autres

PMMA : température de décomposition 300-450°C, carbone résiduel <0,1%, adapté aux outils de haute précision.

CMC : température de décomposition 250-350°C, carbone résiduel <0,05%, adapté à la recherche et au développement.

Progrès : Liant nano à base d'eau, résidu de carbone < 0,03 %, fluidité augmentée de 15 %.

## 3. Sélection des applications

### 3.1 Base de sélection

Suspension : teneur en solides 60-80 %, l'éthanol est du PEG/PW, l'eau est du PVA/CMC.

Procédé : PVA pour le pressage humide, PW pour le pressage à sec.

Application : Choisissez PEG/PVA pour les outils de coupe, SBR pour les moules et PW pour un faible coût.

Coût : PW (510 yuans/kg), PEG (1015 yuans/kg).

### 3.2 Scénarios applicables

PEG : outil YG6/YG8, D50 80150  $\mu$  m, coulabilité <25 s/50 g.

PVA : Outil à grains ultrafins, résistance à vert 812 MPa.

PW : Outils miniers YG8, coût réduit de 20 %.

SBR : moule YG15, résistance aux fissures augmentée de 15 %.

PMMA/CMC : R&D d'outillages aéronautiques, D50 5080  $\mu$  m.

### 3.3 Processus de sélection

Déterminer les caractéristiques d'application et de la boue.

#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

Adhésif assorti.

Vérifier la fluidité, la résistance verte, les résidus de carbone.

Optimiser le processus.

#### 4. Facteurs d'influence

Teneur : 12 % (PEG/PVA), 23 % (PW/SBR).

Bouillie : teneur en solides 70 %, viscosité 200 mPa·s.

Mélange : Agiter à 500-1000 tr/min pendant 12 heures.

Frittage : vide, 350-400°C, résidu de carbone <0,1%.

Environnement : humidité <40%, température 20-30°C.

#### 5. Mesures d'optimisation

Sélectionnez le liant : PEG/PVA (couteau), SBR (moule).

Teneur contrôlée : Résistance à l'état vert 512 MPa.

Bouillie optimisée : teneur en solides 70-75%.

Mélange amélioré : Broyage planétaire à billes, 15 % d'uniformité en plus.

Frittage optimisé : HIP, porosité < 0,01 %.

#### 6. Cas d'application

Outil YG6 : 1,5% PEG, coulabilité 23 s/50 g, dureté 1500 HV.

Outil à grains ultrafins : 1% PVA, résistance à vert 10 MPa, dureté 2000 HV.

Outils miniers YG8 : 2,5 % PW, résistance à la flexion 2,2 GPa.

Moule YG15 : 1,5 % SBR, durée de vie 120 000 fois.

#### 7. Conclusion

Les liants utilisés dans le mélange de carbure cémenté comprennent le polyéthylène glycol (PEG), l'alcool polyvinylique (PVA), la paraffine (PW), le caoutchouc (SBR/BR) et d'autres (tels que le PMMA, le CMC). Le PEG présente une bonne fluidité (< 25 s/50 g) et convient aux outils à usage général ; le PVA présente une résistance à vert élevée (812 MPa) et convient aux outils à grains ultrafins ; le PW est peu coûteux et convient aux outils miniers ; le SBR présente une forte résistance aux fissures et convient aux grands moules. Le choix doit tenir compte des caractéristiques de la boue (teneur en solides : 60-80 %), des exigences du procédé, des scénarios d'application et des coûts. Des mesures d'optimisation peuvent augmenter la fluidité de 20 %, la résistance à vert de 20 %, la dureté de 5 % et réduire les coûts de 20 %. À l'avenir, les nano-liants à base d'eau et les liants doubles amélioreront les performances et la protection de l'environnement.

#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

**Tableau comparatif des caractéristiques et des performances des liants en carbure cémenté**

Liant	Propriétés chimiques	panne température °C	résidu de carbone %	vert force MPa	couleur s/50 g	coût Yuan/kg	avantage	défaut	Principales applications
CHEVILLE	HO( CH <sub>2</sub> CH <sub>2</sub> O ) nH , poids moléculaire 2002000, soluble dans l'eau/éthanol	250400	<0,05	510	<25	1015	Bonne fluidité, décomposition propre, faible coût	Absorption d'humidité, résidu de carbone à poids moléculaire élevé	Outils généraux à (YG6, YG8), moules (YG15)
PVA	(C <sub>2</sub> H <sub>4</sub> O)n , poids moléculaire 20 000-200 000, soluble dans l'eau	200350	<0,1	812	<28	1520	Force de liaison élevée, convient aux formes complexes	Faible solubilité dans l'éthanol, coût de séchage élevé	Outils de coupe à grains ultrafins, moules complexes
PW	Hydrocarbures, poids moléculaire 3001000, solubles dans les solvants organiques	200500	0.10.2	48	<30	510	Faible coût, bon pouvoir lubrifiant	Beaucoup de carbone résiduel, besoin de solvant organique	Outils miniers (YG8), moules à faible coût
SBR/BR	Poids moléculaire 50 000-500 000, soluble dans les solvants organiques	300600	0.20.3	610	<30	2030	Haute élasticité et forte résistance aux fissures	Beaucoup de résidus de carbone, coût élevé	Grands moules (YG15), outils miniers
PMMA	Poids moléculaire 50 000-100 000, soluble dans les solvants organiques	300450	<0,1	812	<28	~50	Haute précision, faible résidu de carbone	Coût élevé, faible solubilité	Développement d'outils de haute précision
CMC	Dérivés de cellulose, solubles dans l'eau	250350	<0,05	46	<25	2025	Bonne solubilité dans l'eau, faible résidu de carbone	Intensité de verte faible	Recherche et développement en laboratoire, outils aéronautiques

Température de décomposition : affecte le processus de frittage, < 400 °C est plus adapté au frittage sous vide.

Résidu de carbone : < 0,1 % Assurer une porosité de frittage < 0,1 %.

Résistance à l'état vert : > 5 MPa répond aux exigences de pressage, 812 MPa convient aux formes

**COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT**

complexes.

Fluidité : < 30 s/50 g, conforme aux exigences de séchage par atomisation (GB/T 1482).

Coût : le PW est le plus économique, le PMMA est le plus élevé.

Sélection d'application : PEG/PVA pour des performances élevées, PW pour un faible coût, SBR pour de grandes billettes.

## 8. Normes

GB/T 3849 : Essai magnétique au cobalt. ISO 4499 : Microstructure.

GB/T 1482 : Fluidité. ISO 3326:2013 : Porosité.

## 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](mailto:sales@chinatungsten.com)

**Tel :** +86 592 5129696

**Official website :** [www.ctia.com.cn](http://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](http://www.ctia.com.cn)

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



appendice:

## Concept, cause et amélioration de la décarburation et de la carburation du carbure cémenté

### 1. Aperçu

Le carbure cémenté est un matériau composite dont la phase dure est le carbure de tungstène (WC) et la phase de liaison est le cobalt (Co) ou le nickel (Ni). Ses performances dépendent fortement du contrôle précis de la teneur en carbone. La teneur théorique en carbone du WC est de 6,13 % en poids et doit être maintenue entre 6,08 et 6,18 % en poids en production réelle (Journal de la Société chinoise des métaux non ferreux, 2024). Des écarts dans la teneur en carbone peuvent entraîner des défauts de décarburation ou de carburation, qui affectent significativement la microstructure et les propriétés du matériau. La décarburation fait référence à une teneur insuffisante en carbone, ce qui entraîne la décomposition du WC ou la formation d'une phase  $\eta$  cassante ( $\text{Co}_3\text{W}_3\text{C}$  ou  $\text{Co}_6\text{W}_6\text{C}$ ), réduisant ainsi la dureté et la résistance ; la carburation fait référence à une teneur excessive en carbone, qui précipite du carbone libre (phase graphite), affectant la résistance à l'usure et l'adhérence du revêtement. Cet article combine les normes nationales chinoises (GB/T 3849), les normes internationales (ISO 4499) et les données de l'industrie pour analyser en détail les concepts, les causes, les effets et les mesures d'amélioration de la décarburation et de la carburation.

### 2. Le concept de décarburation et de carburation

#### 2.1 Décarbonisation

##### Définition de la décarbonisation

La teneur en carbone du carbure cémenté est inférieure au rapport stoechiométrique du WC (6,13 %

#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

en poids) . %), entraînant la décomposition du WC en  $W_2C$  ou la formation de la phase  $\eta$  ( $Co_3W_3C$ ,  $Co_6W_6C$ ).

#### Microstructure

La phase  $\eta$  est en forme d'aiguille ou granulaire, avec une taille de 5 à 25  $\mu m$ , une dureté d'environ HV 1800-2000 et une ténacité à la rupture (KIC) de 4 à 6  $MPa \cdot m^{1/2}$ , ce qui est bien inférieur aux 8 à 15  $MPa \cdot m^{1/2}$  du carbure cémenté dans son ensemble (Journal of Materials Science 2025). La fragilité de la phase  $\eta$  entraînera la propagation des fissures et réduira la fiabilité du matériau.

#### Impact de la décarbonisation

La dureté diminue de 5 à 10 % (par exemple de HV 1800 à HV 1620-1710, ITIA 2024).

La résistance à la flexion (TRS) diminue de 10 à 15 % (de 2 200 MPa à 1 870 à 1 980 MPa, test ASTM B406).

Français La résistance à la corrosion diminue et le taux de corrosion augmente de 15 à 20 % (le taux de corrosion dans un environnement de brouillard salin passe de 0,05 mm/an à 0,06-0,07 mm/an, ASTM G31).

Exemple : Dans des conditions de coupe à grande vitesse (200 m/min), la décarburation entraîne une diminution de la résistance à l'usure des outils en carbure cémenté et la durée de vie de la coupe est raccourcie d'environ 20 à 30 % (Journal de la Société chinoise des métaux non ferreux, 2024).

## 2.2 Cémentation

### définition

La teneur en carbone du carbure cémenté est supérieure au rapport stoechiométrique et le carbone libre (phase graphite) est précipité

Le carbone libre se présente sous forme d'agrégats ou de paillettes, d'une taille de 0,5 à 3  $\mu m$  et d'une dureté extrêmement faible ( $< HV 100$ ). Il est principalement réparti dans la phase cobalt ou aux joints de grains, augmentant ainsi la porosité (The Chinese Journal of Nonferrous Metals, 2024).

La dureté diminue de 3 à 5 % (de HV 1800 à HV 1710-1740, ITIA 2024).

La résistance à la flexion a diminué de 8 à 10 % (de 2 200 MPa à 1 980-2 202 MPa).

Le carbone libre augmente l'angle de mouillage (de  $5^\circ$  à  $15^\circ$ - $25^\circ$ ), ce qui entraîne une diminution de 15 à 20 % de l'adhérence du revêtement (test ASTM C633).

Exemple : Dans les applications d'emboutissage, la carburation augmente la rugosité de surface des matrices en carbure cémenté ( $R_a$  de 0,2  $\mu m$  à 0,3-0,4  $\mu m$ ), augmente le taux de pelage du revêtement d'environ 15 % et réduit la durée de vie de la matrice de 10 à 15 % (Journal of Materials Science 2025).

## 3. Causes de décarburation et de carburation

### 3.1 Décarbonisation

#### Facteurs liés aux matières premières :

#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

Teneur en carbone insuffisante (<6,10 % en poids ), telle que la teneur en carbone de la poudre de WC est inférieure à la valeur théorique (6,13 % en poids ).

Les matières premières contiennent des niveaux élevés d'oxydes (tels que  $WO_3$  ou  $CoO_3$  ) (0,03%-0,1%), qui réagissent avec le carbone pour produire du  $CO/CO_2$  pendant le frittage, consommant du carbone (Journal of Materials Science, 2025).

La qualité du noir de carbone est instable et contient des impuretés (telles que le soufre et l'oxygène) qui entraînent une perte de carbone d'environ 0,05 % à 0,1 % (ITIA 2024).

#### **Facteurs atmosphériques :**

La teneur en oxygène dans l'atmosphère de frittage est > 0,1 %, ce qui conduit à l'oxydation du carbone pour générer du  $CO/CO_2$  , et le taux de décarburation augmente d'environ 10 à 15 %.

la teneur en hydrogène ( $H_2$  ) est trop élevée (> 5 %), elle réagira avec le carbone pour former du  $CH_4$  , enlevant l'élément carbone (ITIA 2024).

$H_2O$  ) dans l'atmosphère est > 0,05 %, ce qui réagit avec le carbone pour produire du  $CO$  et du  $H_2$  , aggravant encore la décarburation (The Chinese Journal of Nonferrous Metals, 2024).

#### **Facteurs de température :**

Température de frittage > 1450°C, le WC se décompose en phase  $W_2C$  ou  $\eta$  (réaction :  $2WC + Co \rightarrow Co_3W_3C + C$  ) .

Les fluctuations de température ( $\pm 10^\circ C$ ) entraînent une décarburation locale et une augmentation du taux de formation de la phase  $\eta$  de 10 à 15 % (The Chinese Journal of Nonferrous Metals 2024).

Si le temps d'isolation est trop long (> 2 heures), la volatilisation du carbone augmente et le risque de décarbonisation augmente d'environ 8 % (Journal of Materials Science 2025).

Facteurs de mélange :

Le mélange est inégal et l'écart de distribution locale du carbone est > 0,1 % en poids , ce qui entraîne une décarbonisation régionale.

Le taux de carbone résiduel des liants organiques (tels que la paraffine PW ou le SBR) est > 0,1 %, et ils ne sont pas complètement décomposés au début du frittage, ce qui affecte le bilan carbone (ITIA 2024).

Les équipements de mélange (tels que les broyeurs à boulets) sont pollués (par exemple par de la limaille de fer), introduisant des oxydes et consommant environ 0,02 à 0,05 % de carbone (The Chinese Journal of Nonferrous Metals, 2024).

### **3.2 Cémentation**

#### **Facteurs liés aux matières premières :**

La teneur en carbone est trop élevée (> 6,15 % en poids ), comme par exemple l'ajout excessif de noir de carbone (> 0,5 % en poids ).

Les particules de noir de carbone ne sont pas de taille uniforme (> 10  $\mu m$  ) , ce qui entraîne un excès local de carbone (ITIA 2024).

Les particules de carbure (comme le WC) dans la matière première sont trop fines (<0,1  $\mu m$  ) , avec une activité de surface élevée et une adsorption de carbone excessive (Journal of Materials Science 2025).

#### **Facteurs atmosphériques :**

#### **COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT**

La teneur en CH<sub>4</sub> dans l'atmosphère de frittage (> 1 %) conduit au dépôt de carbone et augmente le taux de carburation d'environ 10 à 15 %.

Un vide insuffisant (> 10<sup>-2</sup> Pa) inhibe la volatilisation du carbone et provoque la précipitation du carbone libre restant (ITIA 2024).

Lorsque le potentiel carbone dans l'atmosphère est trop élevé (par exemple, potentiel carbone > 1,2), les atomes de carbone diffusent à la surface du matériau et précipitent la phase graphite (The Chinese Journal of Nonferrous Metals, 2024).

#### **Facteurs de température :**

Lorsque la température de frittage est < 1350 °C, la réaction du carbone est incomplète et le carbone libre restant est précipité.

Les fluctuations de température (±10°C) entraînent une carburation locale et la part volumique de carbone libre augmente de 5 à 10 % (Journal of the Chinese Society of Nonferrous Metals, 2024).

Si la vitesse de refroidissement est trop lente (<5°C/min), le carbone précipitera pendant le processus de refroidissement et le taux de carburation augmentera d'environ 5 % (Journal of Materials Science 2025).

#### **Facteurs de mélange :**

Le taux de carbone résiduel de la cire de paraffine (PW) ou du SBR dans le mélange est de 0,15 % à 0,3 %, et la teneur en carbone augmente après décomposition.

Un temps de mélange insuffisant (< 10 heures) entraîne une distribution inégale du carbone et une augmentation du taux de carburation locale d'environ 8 à 12 % (ITIA 2024).

Le noir de carbone s'agglomère pendant le processus de mélange (particules agglomérées > 20 μ m), ce qui entraîne un excès local de carbone (The Chinese Journal of Nonferrous Metals, 2024).

#### **Mécanisme microscopique :**

Lors de la décarburation, la phase η réduit l'énergie de liaison de l'interface WC-Co (de 1,2 J/m<sup>2</sup> à 0,8-1,0 J/m<sup>2</sup>) et augmente la tendance à la propagation des fissures (Journal of Materials Science 2025).

Lors de la cémentation, le carbone libre augmente l'angle de mouillage (de 5° à 15°-25°), réduit la mouillabilité du cobalt par rapport au WC et affecte l'adhérence du revêtement (ITIA 2024).

Un petit écart dans la teneur en carbone (± 0,1 % en poids) entraînera une augmentation de la contrainte interfaciale d'environ 10 à 15 %, aggravant encore les micro-défauts (The Chinese Journal of Nonferrous Metals 2024).

## **4. Effets de la décarburation et de la carburation**

### **4.1 Microstructure**

#### **Décarburation:**

La phase η détruit l'interface WC-Co, le volume du pool de cobalt augmente de 5 à 10 % et les grains croissent anormalement (de 0,5 μm à 1 à 2 μm).

Augmentation de la porosité de 0,05 % à 0,1 % (ISO 3326:2013).

Une augmentation d'environ 10 % de la contrainte interfaciale entraîne une augmentation de 15 à 20 % de la probabilité d'initiation de microfissures (Journal of Materials Science 2025).

#### **COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT**

#### **carburation:**

Le carbone libre s'accumule aux joints de grains, augmentant la porosité de 0,1 à 0,15 %.

La phase cobalt est inégalement répartie, la mouillabilité locale diminue de 10 à 15 % et la résistance des joints de grains diminue d'environ 5 % (The Chinese Journal of Nonferrous Metals 2024).

Les particules de carbone libres induisent une concentration de contraintes et augmentent la tendance à la formation de pores d'environ 8 % (ITIA 2024).

## **4.2 Performance**

#### **dureté:**

Décarbonisation : diminution de 5%-10% (de HV 1800 à HV 1620-1710).

Cémentation : diminution de 3%-5% (HV 1800 à HV 1710-1740).

#### **force:**

Décarburation : La résistance à la flexion diminue de 10 à 15 % (2 200 MPa à 1 870 à 1 980 MPa).

Cémentation : diminuée de 8%-10% (2200 MPa à 1980-2020 MPa).

#### **dureté:**

Décarburation : La ténacité à la rupture (KIC) diminue de 20 à 25 % (de 10 MPa·m<sup>1/2</sup> à 7,5 à 8 MPa·m<sup>1/2</sup>).

Cémentation : Légèrement augmentée de 5%-8% (de 10 MPa·m<sup>1/2</sup> à 10,5-10,8 MPa·m<sup>1/2</sup>).

#### **Résistance à la corrosion :**

Décarburation : Le taux de corrosion augmente de 15 à 20 % (de 0,05 mm/an à 0,06 à 0,07 mm/an, ASTM G31).

Carburation : Le taux de corrosion augmente d'environ 5 % (0,05 mm/an à 0,0525 mm/an).

#### **Adhérence du revêtement :**

Cémentation : L'adhérence diminue de 15 à 20 % (de 50 MPa à 40 à 42,5 MPa, ASTM C633).

Décarburation : L'adhérence diminue d'environ 5 % (50 MPa à 47,5 MPa).

#### **Résistance à l'abrasion :**

Décarburation : Le taux d'usure augmente de 20 à 25 % (de 0,06 mm<sup>3</sup> / N·m à 0,072 à 0,075 mm<sup>3</sup> / N·m, ASTM G65).

Cémentation : Le taux d'usure augmente de 10 à 15 % (de 0,06 mm<sup>3</sup>/N·m à 0,066 à 0,069 mm<sup>3</sup>/N·m).

## **4.3 Application**

#### **Couteau:**

La décarburation entraîne une diminution de la résistance à l'usure de l'outil et une réduction de la durée de vie de l'outil de 20 à 30 %. Par exemple, en coupe à grande vitesse (200 m/min), la durée de vie passe de 2 heures à 1,4 à 1,6 heure (Journal de la Société chinoise des métaux non ferreux, 2024).

La carburation augmente le taux de décollement du revêtement de 15 à 20 % et réduit sa durée de vie de 10 à 15 % (Journal of Materials Science 2025).

#### **COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT**

### **Moule :**

La décarburation entraîne une diminution de la résistance aux chocs du moule et une réduction de sa durée de vie de 15 à 20 %. Par exemple, la durée de vie d'un moule d'emboutissage est réduite de 120 000 à 96 000 à 102 000 fois.

de surface du moule (Ra passe de 0,2  $\mu\text{m}$  à 0,3-0,4  $\mu\text{m}$ ) et réduit sa durée de vie de 10 à 15 % (Journal of Materials Science 2025).

### **Outils miniers :**

La décarbonisation augmente le risque de fracture d'environ 25 à 30 %, par exemple la durée de vie d'un trépan minier dans le forage du granit passe de 2 000 m à 1 400-1 500 m (ITIA 2024).

La cémentation entraîne une diminution de la résistance à l'usure d'environ 10 à 15 % et une diminution de la durée de vie du foret de 10 à 12 % (Journal of the Chinese Society of Nonferrous Metals, 2024).

## **5. Mesures d'amélioration**

### **5.1 Contrôle des matières premières**

La teneur en carbone a été strictement contrôlée à 6,10-6,15 % en poids ( $\pm 0,05$  % en poids) et une poudre de WC de haute pureté (teneur en carbone 6,12-6,14 % en poids, oxyde  $< 0,02$  %) a été utilisée.

L'ajout d'inhibiteurs de grains tels que  $\text{Cr}_3\text{C}_2$  (0,3 % -0,8 %) ou VC (0,1 %-0,5 %) inhibe la formation de la phase  $\eta$  et réduit la proportion volumique de la phase  $\eta$  de 8 % à 12 % (ITIA 2024).

Le noir de carbone de haute pureté (pureté  $> 99,9$  %) est utilisé pour réduire l'interférence des impuretés (telles que le soufre et l'oxygène) sur la teneur en carbone, et le taux de perte de carbone est contrôlé à 0,01 %-0,03 % (Journal of the Chinese Society of Nonferrous Metals, 2024).

### **5.2 Optimisation du mélange**

En utilisant un broyeur à boulets planétaire pour le mélange (12 à 18 heures, 300 à 500 tr/min), l'uniformité est améliorée de 10 à 15 % et l'écart de distribution du carbone est  $< 0,05$  % en poids. Utilisez des liants à faible teneur en résidus de carbone, tels que le PEG ou le PVA (taux de résidus de carbone  $< 0,03$  %), pour remplacer la cire de paraffine traditionnelle (taux de résidus de carbone 0,1 % à 0,2 %).

L'optimisation des supports de broyage à boulets (tels que les boulets WC au lieu des boulets d'acier) peut réduire la pollution par le fer et réduire la consommation de carbone d'environ 0,02 % (Journal of Materials Science, 2025).

L'ajout de dispersants (tels que l'acide stéarique, 0,1 % à 0,3 %) peut réduire l'agglomération du noir de carbone et améliorer l'uniformité de 5 % à 8 % (The Chinese Journal of Nonferrous Metals, 2024).

### **5.3 Optimisation du frittage**

#### **COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT**

Le frittage sous vide est adopté (degré de vide  $< 10^{-3}$  Pa), et l'oxygène dans l'atmosphère est contrôlé pour être  $< 0,05\%$ ,  $H_2 < 2\%$  et  $H_2O < 0,03\%$  pour éviter l'oxydation ou la volatilisation du carbone.

La température de frittage est contrôlée à  $1380-1420^{\circ}C (\pm 5^{\circ}C)$  et le temps de maintien est de 1 à 1,5 heure pour éviter la décomposition du WC ou la précipitation du carbone libre.

La vitesse de refroidissement est contrôlée à  $5-10^{\circ}C/min$ , réduisant le risque de précipitation de carbone libre d'environ  $5\%$  (Journal of Materials Science 2025).

Le pressage isostatique à chaud (HIP,  $100-150$  MPa,  $1350-1400^{\circ}C$ ) élimine la porosité, avec une porosité  $< 0,01\%$  (ISO 3326:2013).

En utilisant un système de surveillance de l'atmosphère (détection en temps réel de la teneur en  $CO/CH_4$ ) pour garantir que le potentiel carbone est  $< 1,0$ , le taux de carburation est réduit d'environ  $10\%$  (ITIA 2024).

#### 5.4 Retour de détection

Le test magnétique au cobalt (GB/T 3849) est utilisé pour détecter l'écart de teneur en carbone ( $\pm 0,05\%$  en poids) et contrôler avec précision la phase  $\eta$  et le carbone libre.

En combinant la diffraction des rayons X (DRX) et la microscopie électronique à balayage (MEB) pour analyser la microstructure, le taux de détection de la phase  $\eta$ /carbone libre a augmenté de  $15$  à  $20\%$ .

La spectroscopie dispersive en énergie (EDS) est utilisée pour analyser la distribution du carbone, avec l'écart contrôlé à  $\pm 0,03\%$  en poids et le taux de défauts réduit de  $10$  à  $15\%$  (The Chinese Journal of Nonferrous Metals, 2024).

Mettre en œuvre une surveillance par spectroscopie infrarouge en ligne pour détecter la teneur en  $CO/CO_2$  dans l'atmosphère de frittage et ajuster le processus en temps réel, réduisant ainsi le taux de défauts d'environ  $8\%$  (ITIA 2024).

#### 5.5 Traitement de surface

La couche de carbone libre (épaisseur  $0,01-0,03$  mm) a été éliminée par polissage et la rugosité de surface  $R_a$  était  $< 0,2 \mu m$ .

En utilisant PVD TiN, Revêtement TiAlN ou CrN (épaisseur  $2-5 \mu m$ ), l'adhérence du revêtement est améliorée de  $15\%$  à  $20\%$  (ASTM C633).

Le nettoyage au plasma est utilisé pour éliminer le carbone résiduel sur la surface et l'adhérence du revêtement est améliorée d'environ  $10\%$  (Journal of Materials Science 2025).

Le traitement de nitruration à basse température ( $500-600^{\circ}C$ ) augmente la dureté de surface d'environ  $5\%$  et la résistance à la corrosion de  $10\%$  à  $15\%$  (ASTM G31).

Effet:

La proportion volumique de la phase  $\eta$  et du carbone libre est réduite de  $10$  à  $15\%$ .

Dureté augmentée de  $5\%$  à  $8\%$  (de HV 1710 à HV 1800-1850).

La résistance à la flexion a augmenté de  $10$  à  $15\%$  (de  $1980$  MPa à  $2200$  à  $2300$  MPa).

La résistance à l'usure est améliorée de  $15$  à  $20\%$  et la durée de vie des outils et des moules est

#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

prolongée de 20 à 30 %.

## 6. Cas d'application

Outils en carbure cémenté à faible teneur en Co (WC-6%Co) : Grâce au frittage sous vide (1400°C, degré de vide  $10^{-3}$  Pa) et à l'ajout de 0,5 % de  $Cr_3C_2$ , la phase  $\eta$  est réduite de 10 à 12 %, la dureté atteint HV 1850 et la durée de vie est augmentée de 1,5 heure à 1,8 à 2 heures lors de la coupe d'acier au carbone moyen (200 m/min) (Journal of the Chinese Society of Nonferrous Metals, 2024).

Moule en carbure cémenté à haute teneur en Co (WC-15%Co) : Teneur en carbone contrôlée avec précision (6,12 % en poids) et polie, le carbone libre est réduit de 10 à 15 %, la résistance à la flexion atteint 2,4 à 2,5 GPa et la durée de vie du moule d'emboutissage est augmentée de 100 000 fois à 115 000 à 120 000 fois (ITIA 2024).

Moule en carbure cémenté à base de Ni (WC-10%Ni) : en utilisant le HIP (150 MPa, 1400°C) et le revêtement CrN, la porosité est  $< 0,01$  %, le taux de corrosion est  $< 0,005$  mm/an et la durée de vie des composants d'ingénierie marine est augmentée de 0,8 an à 1,1-1,2 an (Journal of Materials Science 2025).

Outils en carbure à grains ultrafins (granulométrie WC  $0,2 \mu m$ ) : Utilisation de poudre nano-WC et revêtement  $Al_2O_3$  ( $3 \mu m$ ), la dureté atteint HV 1950-2000 et la durée de vie est augmentée de 3 heures à 3,8-4 heures lors de la coupe d'alliages à haute température (250 m/min) (Journal de la Société chinoise des métaux non ferreux, 2024).

## 7. Normes

GB/T 3849-2015 : Méthode d'essai des propriétés magnétiques du cobalt dans le carbure cémenté, détection de l'écart de teneur en carbone.

ISO 4499-2:2020 : Évaluation de la microstructure des carbures cémentés, analyse de la phase  $\eta$  et du carbone libre.

ASTM B406-96(2021) : Méthode d'essai de résistance à la flexion du carbure cémenté.

ASTM G31-21 : Méthode d'essai de résistance à la corrosion des matériaux métalliques.

ASTM C633-13(2021) : Méthode d'essai pour l'adhérence des revêtements.

ISO 3326:2013 : Méthode de détermination de la porosité des carbures cémentés.

ASTM G65-00(2010) : Test d'abrasion sur roue en caoutchouc/sable sec, évaluant la résistance à l'usure.

### 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](mailto:sales@chinatungsten.com)

**Tel :** +86 592 5129696

**Official website :** [www.ctia.com.cn](http://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](http://www.ctia.com.cn)

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