

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

中钨智造科技有限公司

CTIA GROUP LTD

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

**COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT**

Copyright© 2024 CTIA All Rights Reserved  
标准文件版本号 CTIAQCD-MA-E/P 2024 版  
[www.ctia.com.cn](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 commerciale mondiale, devenant ainsi un fournisseur de solutions d'application complètes dans les domaines des produits chimiques à base de tungstène, des métaux tungstène, des carbures cémentés, des alliages haute densité, du molybdène et de ses alliages.

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

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

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



### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

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

## 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)



## Partie 2 : Processus de préparation du carbure cémenté

### Chapitre 4 : Sélection des matières premières et préparation de la poudre

Le carbure cémenté de tungstène est fabriqué à partir de carbure de tungstène (WC) comme phase dure et de cobalt (Co) ou de nickel (Ni) comme phase de liaison par métallurgie des poudres. Ses propriétés (dureté HV 1 500-2 500  $\pm$  30, ténacité  $K_{Ic}$  820 MPa·m<sup>1/2</sup>  $\pm$  0,5, résistance à la compression > 4 000 MPa  $\pm$  100 MPa) dépendent directement de la qualité des matières premières et du procédé de préparation de la poudre. Le choix des matières premières et la préparation de la poudre sont à la base de la production de carbure cémenté, qui déterminent la microstructure (granulométrie WC 0,110  $\mu$ m  $\pm$  0,01  $\mu$ m, uniformité de la distribution du Co > 95 %  $\pm$  1 %) et les performances finales (conductivité thermique 80-120 W/m·K  $\pm$  5 W/m·K, résistance à la corrosion pH 212).

Ce chapitre analyse en détail la synthèse de la poudre de carbure de tungstène, la sélection de la phase de liaison et des additifs, la technologie de prétraitement de la poudre et les méthodes de caractérisation de la poudre, couvrant les paramètres du processus, les principes scientifiques, les facteurs d'influence, les stratégies d'optimisation et les applications d'ingénierie.

La préparation de la poudre nécessite un contrôle précis de la granulométrie du WC (0,110  $\mu$ m  $\pm$  0,01  $\mu$ m), de la pureté (carbone libre < 0,1 %  $\pm$  0,01 %), des caractéristiques de la phase de liaison (pureté Co/Ni > 99,8 %  $\pm$  0,01 %) et de la fluidité de la poudre (1 316 secondes/50 g  $\pm$  0,5 seconde) afin de garantir une densité de frittage (> 99 %  $\pm$  0,1 %) et une constance des performances (écart de dureté <  $\pm$  30 HV). Par exemple, une poudre de WC submicronique (< 0,5  $\mu$ m  $\pm$  0,01  $\mu$ m) peut

#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

augmenter la dureté de l'outil à  $HV\ 2\ 300 \pm 30$  et prolonger la durée de vie de la coupe aéronautique à 15 heures  $\pm 1$  heure ; La poudre de Co de haute pureté ( $> 99,9\% \pm 0,01\%$ ) améliore la ténacité du trépan ( $K_{1c} > 18\ MPa \cdot m^{1/2} \pm 0,5$ ), et la durée de vie minière dépasse  $1\ 200\ m \pm 100\ m$ .

les performances du chapitre 3 à travers la source de dureté WC ( $HV\ 2000 - 3000 \pm 50$ ) et la contribution de la ténacité Co ( $K_{1c}\ 1520\ MPa \cdot m^{1/2} \pm 0,5$ ), fournissant une base théorique et de processus pour le formage et le frittage ultérieurs (chapitre 5).

#### 4.0 Aperçu des types de carbure cimenté et des matières premières et auxiliaires

Le carbure cimenté est un matériau composite hautes performances composé de carbure de tungstène (WC) comme phase dure et de cobalt (Co) ou de nickel (Ni) comme phase de liaison. Il est largement utilisé dans les outils de coupe, les moules, les pièces résistantes à l'usure et d'autres domaines. Selon les exigences d'application et les caractéristiques de performance, le carbure cimenté peut être divisé en plusieurs catégories : général (série YG), résistant à la chaleur et à l'usure (série YT), haute ténacité et résistant aux chocs (série YW), carbure cimenté à base de nickel (série YN), alliage à haute entropie et spécial pour la fabrication additive. Les types et proportions de matières premières et auxiliaires varient selon le type de carbure cimenté et le procédé de préparation. On les divise généralement en trois catégories : matières premières principales, matières premières auxiliaires et matières auxiliaires. La sélection et l'utilisation de ces matériaux doivent respecter scrupuleusement les normes en vigueur afin de garantir la qualité du produit et la constance du procédé.

##### 4.0.0 Principaux types de carbure cimenté

Le tableau suivant répertorie en détail les principaux types de carbure cimenté et leurs caractéristiques, exigences de processus, domaines d'application et normes suivies, reflétant ses divers scénarios d'application et exigences de processus.

taper	Principaux ingrédients et caractéristiques	Exigences du processus	Domaines d'application	Exigences standard
Série YG	Principalement composé de WC et de Co, complété par du noir de carbone, avec une dureté et une ténacité élevées	Contrôler strictement l'atmosphère et la température de frittage pour éviter l'introduction d'impuretés	Outils de coupe (tels que outils de tournage, fraises)	Conforme aux exigences d'échantillonnage GB/T 5314-2011 et suit le processus de frittage GB/T 26048-2010
Série YT	Ajoutez du TiC, une lubrification à la paraffine est nécessaire pour améliorer la formabilité, la résistance aux températures élevées et la résistance à l'usure.	Contrôler l'atmosphère et la température de frittage pour éviter les impuretés	Découpe à grande vitesse (comme le traitement de l'acier)	Conforme aux exigences d'échantillonnage GB/T 5314-2011 et suit le processus de frittage GB/T 26048-2010

#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

taper	Principaux ingrédients et caractéristiques	Exigences du processus	Domaines d'application	Exigences standard
Série YW	Contient du TaC et/ou du NbC , nécessite une protection à l'argon, possède à la fois une ténacité et des performances à haute température	Assurer la pureté de l'atmosphère d'argon et contrôler précisément la température	Matrices robustes (telles que les matrices d'estampage)	Conforme aux exigences d'échantillonnage GB/T 5314-2011 et suit le processus de frittage GB/T 26048-2010
Série YN	Remplacez Co par Ni et ajoutez TiN pour obtenir une excellente résistance à la corrosion	Contrôler l'atmosphère et la température de frittage pour éviter l'oxydation	Environnement résistant à la corrosion (comme les équipements chimiques)	Conforme aux exigences d'échantillonnage GB/T 5314-2011 et suit le processus de frittage GB/T 26048-2010
Alliage à haute entropie	Les combinaisons multi-éléments (telles que Cr, V, Mo, W, Ta) nécessitent un mélange précis et un processus HIP pour garantir l'uniformité	Rapport précis, le frittage HIP nécessite une pression élevée contrôlée (50-100 MPa)	Environnements extrêmes (tels que des conditions de température et de pression élevées )	Conforme aux exigences d'échantillonnage GB/T 5314-2011 et suit le processus de frittage GB/T 26048-2010
Fabrication additive	Poudre sphérique, préparée par atomisation au gaz, avec des agents de traitement de surface ajoutés pour améliorer les performances	Procédé d'atomisation de gaz, contrôle strict de l'atmosphère et de la température	Pièces fabriquées de manière additive (par exemple, composants aérospatiaux)	Conforme aux exigences d'échantillonnage GB/T 5314-2011 et suit le processus de frittage GB/T 26048-2010
illustrer	Tous les types doivent suivre les normes d'échantillonnage de GB/T 5314-2011 pour garantir la cohérence des lots, et le processus de frittage est effectué conformément à GB/T 26048-2010, en mettant l'accent sur le contrôle précis de l'atmosphère et de la température pour éviter l'introduction d'impuretés.			

#### 4.0.1 Principales matières premières du carbure cémenté

Les principales matières premières sont les composants de base du carbure cémenté, qui influencent directement ses propriétés mécaniques et sa durée de vie. Voici un aperçu des principales matières premières :

##### **Carbure de tungstène (WC, carbure de tungstène) :**

Fonction : En tant que phase dure, elle offre une dureté extrêmement élevée (> 2000 HV) et une résistance à l'usure, représentant 70 à 94 % ( en poids %) de la composition totale.

Spécifications : Pureté  $\geq 99,8\%$  , granulométrie 0,2-5  $\mu\text{m}$  ( grains fins 0,2-0,5  $\mu\text{m}$  , grains grossiers > 2  $\mu\text{m}$  ) .

Champ d'application : Tous types de carbure.

##### **Poudre de cobalt (Co, poudre de cobalt) :**

Fonction : Phase de liaison traditionnelle, elle améliore la ténacité et la résistance à la flexion. Sa teneur est généralement comprise entre 6 et 25 % ( en poids ) .

Spécifications : Pureté  $\geq 99,9\%$  , granulométrie 1-5  $\mu\text{m}$  .

#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

Champ d'application : séries YG, YT, YW et alliages à haute entropie.

### **Poudre de nickel**

Fonction : Remplace le cobalt comme phase de liaison résistante à la corrosion, améliore la résistance à l'oxydation, teneur de 5 à 20 % ( en poids %).

Spécifications : Pureté  $\geq 99,9\%$ , granulométrie 1-5  $\mu\text{m}$ .

Champ d'application : série YN et types de fabrication additive.

### **Autres carbures :**

#### **Carbure ( TiC )**

à l'usure des cratères, teneur 5%-20% ( % en poids ), pureté  $\geq 99,5\%$ , granulométrie 0,5-2  $\mu\text{m}$ , convient aux séries YT et YN.

#### **Carbure ( TaC ) / Carbure de niobium ( NbC )**

Améliore la résistance à haute température et la résistance à la déformation, teneur de 2 à 10 % ( en poids %), pureté  $\geq 99,5\%$ , granulométrie de 0,5 à 3  $\mu\text{m}$ , convient à la série YW et aux alliages à haute entropie.

## **4.0.2 Matières premières auxiliaires**

Les matières premières auxiliaires sont utilisées pour optimiser les performances ou s'adapter aux exigences spécifiques des procédés. Leur sélection est flexible en fonction de la qualité et du contexte d'application :

### **Ajusteur de carbone :**

#### **Noir de carbone**

Contrôler l'équilibre du carbone pour éviter la formation de phase  $\eta$  (  $\text{Co}_3\text{W}_3\text{C}$  ) ou de carbone libre, teneur 0,1%-0,5% ( % en poids ), pureté  $\geq 99\%$ , granulométrie  $< 1\ \mu\text{m}$ , adapté à tous les types (en particulier le frittage en phase liquide).

#### **Graphite**

En tant que source de carbone, ajustez la teneur en carbone à 0,1%-0,3% ( % en poids ), pureté  $\geq 99,5\%$ , granulométrie 1-5  $\mu\text{m}$ , adaptée à la série YG et aux poudres de fabrication additive.

### **Éléments des terres rares :**

#### **Cérium (Ce) / Lanthane (La)**

Affiner les grains et améliorer la résistance à la flexion. La teneur en oxydes est de 0,1 à 0,5 % ( en poids ) avec une pureté  $\geq 99,9\%$ . Convient aux nuances à grains fins (telles que YG6F, YN6F).

#### **Nitride/Boride**

nitride ( TiN )/borure de tungstène (WB) : améliore la dureté de surface et la résistance à la corrosion, teneur 1%-5% ( wt %), pureté  $\geq 99,5\%$ , granulométrie 0,5-3  $\mu\text{m}$ , convient aux séries YT, YN et à la fabrication additive .

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

#### 4.0.3 Excipients

Les matériaux auxiliaires soutiennent le processus de préparation et de frittage, garantissant la contrôlabilité du processus et la qualité du produit :

##### Lubrifiant:

##### acide stéarique

Améliore la fluidité du mélange et du pressage, teneur 0,5%-2% ( % en poids ), qualité industrielle, pureté  $\geq 95\%$ , convient à tous les processus de pressage.

##### Paraffine

Améliore la résistance du corps vert, teneur de 1% à 3% ( en poids ), point de fusion de 50 à 60°C, adapté aux corps verts aux formes complexes.

##### Solvant:

##### Éthanol/Acétone

Utilisé pour le milieu de dispersion de mélange humide, le nettoyage et le séchage, de qualité analytique, concentration  $\geq 99,5\%$ , adapté à tous les mélanges humides et au post-traitement de fabrication additive.

##### Gaz atmosphérique :

##### Hydrogène (H<sub>2</sub>) /Argon ( Ar )/Azote (N<sub>2</sub>)

Fournir une atmosphère réductrice ou inerte pour éviter l'oxydation, pureté  $> 99,99\%$ , convient pour YG/YT (hydrogène), YW/YN/HIP (argon), alliage TiN (azote).

##### Flux (facultatif) :

Acide borique (H<sub>3</sub>BO<sub>3</sub>) : réduit la température de frittage, teneur 0,1%-0,5%, qualité analytique, adapté aux grains fins et aux alliages à haute entropie.

#### 4.0.4 Tableau détaillé des matières premières et auxiliaires

Le tableau suivant répertorie systématiquement toutes les matières premières et auxiliaires requises pour différents types de carbures cémentés (y compris la série YN de carbures cémentés à base de nickel), couvrant les spécifications, les fonctions et les domaines d'application applicables.

catégorie	Matériel	Spécification	effet	Types applicables
Principales matières premières	Carbure de tungstène (WC)	Pureté $\geq 99,8\%$ , taille des particules 0,2-5 $\mu\text{m}$	Phase dure, offrant une dureté et une résistance à l'usure élevées, teneur de 70 à 94 % ( en poids %)	Tous types (YG, YT, YW, YN, haute entropie, fabrication additive)
	Poudre de cobalt (Co)	Pureté $\geq 99,9\%$ , taille des particules 1-5 $\mu\text{m}$	Phase liante, améliore la ténacité et la résistance à la flexion, teneur 6%-25% ( % en poids )	YG (6 %-15 %), YT (6 %-10 %), YW (8 %-12 %), entropie élevée

#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

catégorie	Matériel	Spécification	effet	Types applicables
	Poudre de nickel (Ni)	Pureté $\geq 99,9\%$ , taille des particules 1-5 $\mu\text{m}$	Phase de liaison résistante à la corrosion, résistance à l'oxydation améliorée, teneur de 5 à 20 % ( en poids %)	Série YN (comme YN6, YN8), fabrication additive
	Carbure de titane (TiC)	Pureté $\geq 99,5\%$ , taille des particules 0,5-2 $\mu\text{m}$	Améliore la résistance aux hautes températures et à l'usure en cratère, teneur de 5 à 20 % ( en poids %)	Série YT (comme YT15, YT30), série YN
	Carbure de tantale (TaC) / Carbure de niobium (NbC)	Pureté $\geq 99,5\%$ , taille des particules 0,5-3 $\mu\text{m}$	Améliore la résistance à haute température et à la déformation, teneur de 2 à 10 % ( en poids %)	Série YW (comme YW1, YW2), alliage à haute entropie
Matières premières auxiliaires	Noir de carbone (C)	Pureté $\geq 99\%$ , taille des particules < 1 $\mu\text{m}$	Contrôler l'équilibre du carbone et prévenir la formation de phase $\eta$ , teneur 0,1%-0,5% ( % en poids )	Tous types (en particulier frittage en phase liquide)
	Graphite	Pureté $\geq 99,5\%$ , taille des particules 1-5 $\mu\text{m}$	En tant que source de carbone, ajustez la teneur en carbone à 0,1 %-0,3 % ( % en poids )	Série YG, poudre de fabrication additive
	Éléments des terres rares (Ce/La)	Forme d'oxyde, pureté $\geq 99,9\%$	Affiner les grains et améliorer la résistance à la flexion, teneur de 0,1 % à 0,5 % ( en poids %)	Nuances à grains fins (telles que YG6F, YN6F)
	Nitride de titane (TiN) / borure de tungstène (WB)	Pureté $\geq 99,5\%$ , taille des particules 0,5-3 $\mu\text{m}$	Améliore la dureté de surface et la résistance à la corrosion, teneur de 1 à 5 % ( en poids %)	Série YT, YN, fabrication additive
Excipients	acide stéarique	Qualité industrielle, pureté $\geq 95\%$	Améliorer la fluidité du mélange et du pressage, teneur 0,5%-2% ( % en poids )	Tous les processus de pressage
	Paraffine	Point de fusion 50- 60°C	Améliore la résistance du corps vert, teneur de 1 à 3 % ( en poids %)	Ébauche de forme complexe
	Éthanol/Acétone	Qualité analytique, concentration $\geq$ 99,5 %	Milieux de dispersion par mélange humide, nettoyage et séchage	Mélange entièrement humide, fabrication additive
	Hydrogène (H <sub>2</sub> ) /Argon (Ar) /Azote (N <sub>2</sub> )	Pureté > 99,99%	Atmosphère réductrice ou inerte pour éviter l'oxydation	Tous procédés de frittage (hydrogène : YG, YT ; argon : YW, YN, HIP ; azote : alliage TiN )
	Acide borique (H <sub>3</sub> BO <sub>3</sub> )	Qualité analytique	Flux, réduit la température de frittage, teneur 0,1%-0,5% ( % en poids )	Alliage à grain fin et à haute entropie
Matériaux de procédés spéciaux	Agent sphéroïdisant (tel que le PVA)	Qualité industrielle	Améliorer la sphéricité de la poudre, teneur de 0,1% à 0,5% ( % en poids )	Fabrication additive (GB/T 34505- 2017)
	Précurseurs CVD	Haute pureté	Pour carbure revêtu	Carbure revêtu (séries YT, YN)

**COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT**

catégorie	Matériel	Spécification	effet	Types applicables
	(tels que TiCl <sub>4</sub> , CH <sub>4</sub> )			

Remarque : Le tableau couvre les matières premières et auxiliaires nécessaires aux différents types de carbure cimenté, y compris les spécifications, les fonctions et le champ d'application applicable, afin de garantir l'exhaustivité et la pertinence du processus de préparation.

#### 4.1 Propriétés physiques et chimiques et préparation de la poudre de carbure de tungstène (WC)

Le carbure de tungstène (WC) est le composant principal du carbure cimenté, avec une fraction massique de 70 % à 95 % ± 1 %. Ses excellentes propriétés physiques et chimiques déterminent directement les performances globales du carbure cimenté. La poudre de WC présente une dureté élevée (HV 2000-3000 ± 50), un point de fusion élevé (2870 °C ± 10 °C), une excellente stabilité chimique (enthalpie anti-oxydation < 800 kJ/mol ± 20 kJ/mol) et une bonne résistance à l'usure et à la corrosion. La préparation de la poudre WC nécessite un contrôle strict de la taille des particules (0,1-10 µm ± 0,01 µm), de la pureté (carbone libre < 0,1% ± 0,01%, oxyde < 0,05% ± 0,01%) et de la morphologie (polygonale, bord < 0,05 µm ± 0,01 µm) pour répondre aux besoins des applications haut de gamme telles que les outils d'aviation (vitesse de coupe > 300 m/min ± 10 m/min), les forets miniers (résistance à la compression > 200 MPa ± 10 MPa) et les moules résistants à l'usure (durée de vie d'extrusion > 10<sup>6</sup> fois ± 10<sup>5</sup> fois).

La carbonisation est la principale méthode de synthèse de la poudre de carbure de tungstène (WC) en raison de sa technologie mature, de son rendement élevé (> 10 t/lot ± 1 t) et de sa part de marché de > 90 % ± 2 %. De plus, des technologies émergentes telles que le plasma, le dépôt mécano-chimique et le dépôt chimique en phase vapeur (CVD) ont été intégrées aux procédés modernes afin de répondre à des exigences spécifiques en matière de granulométrie et de performances. Les principales méthodes de synthèse de la poudre de carbure de tungstène (WC) préparée par carbonisation sont les suivantes :

##### Méthode de carburation traditionnelle :

La poudre de tungstène (W) et le noir de carbone (C) réagissent à une température élevée de 1450-1600°C ± 10°C pour générer du WC, généralement dans un réacteur à hydrogène (H<sub>2</sub>, débit 50 L/min ± 5 L/min) ou sous vide (< 10<sup>-2</sup> Pa ± 10<sup>-3</sup> Pa). Atmosphère, utilisant un four graphite (puissance > 100 kW ± 10 kW). La vitesse de chauffe est de 5 à 10 °C/min ± 0,5 °C/min, et le temps d'isolation est de 2 à 4 heures ± 0,1 heure. Ce four est adapté à une production à grande échelle avec un rendement élevé (> 10 t/lot ± 1 t).

##### Méthode de carbonisation au four rotatif :

Basée sur la méthode de carbonisation traditionnelle, un four rotatif (vitesse de rotation 5 tr/min ± 0,5 tr/min) est utilisé pour améliorer l'uniformité de la taille des particules (écart < 5 % ± 1 %) et réduire l'agglomération (< 5 % ± 1 %) grâce au mélange dynamique, ce qui convient à la production

#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

de WC submicronique ( $< 0,5 \mu\text{m} \pm 0,01 \mu\text{m}$ ).

#### **Méthode de carbonisation à basse température :**

réagir à  $< 1200^\circ\text{C} \pm 10^\circ\text{C}$ , combinée à des sources de carbone renouvelables (telles que le biochar) et contrôler la croissance des grains ( $< 0,1 \mu\text{m} \pm 0,01 \mu\text{m}$ ) grâce à des additifs (tels que VC,  $\text{Cr}_3\text{C}_2$ ), adaptée à la poudre WC à l'échelle nanométrique, réduisant la consommation d'énergie de  $20\% \pm 5\%$ . Ces méthodes nécessitent toutes le contrôle du rapport E:C ( $1:1,02 \pm 0,01$ ), de l'atmosphère ( $\text{O}_2 < 10 \text{ ppm} \pm 1 \text{ ppm}$ ) et de la vitesse de refroidissement ( $> 50^\circ\text{C}/\text{min} \pm 5^\circ\text{C}/\text{min}$ ) pour garantir la pureté (carbone libre  $< 0,1\% \pm 0,01\%$ ) et la distribution granulométrique (écart  $< 5\% \pm 1\%$ ).

Cette section analysera de manière exhaustive les propriétés physiques et chimiques de la poudre WC, le processus de production (principalement la méthode de carbonisation), l'importance et la technologie de contrôle de la taille des particules et de la distribution des grains, l'optimisation de la pureté et ses effets d'application dans de multiples domaines.

#### **4.1.0 Caractéristiques physiques et propriétés chimiques de la poudre de carbure de tungstène**

##### **Caractéristiques physiques de la poudre de carbure de tungstène (WC)**

En tant que composant principal du carbure cémenté, les propriétés physiques de la poudre de carbure de tungstène (WC) déterminent directement ses performances. Voici une description complète des caractéristiques physiques de la poudre de WC, couvrant la structure cristalline, la masse volumique (divisée en masse volumique apparente et masse volumique après tassement), le point de fusion, la conductivité thermique, le coefficient de dilatation thermique, la morphologie et d'autres propriétés connexes.

##### **(1) Structure cristalline de la poudre de carbure de tungstène**

###### **Type de cristal**

La poudre de WC appartient au système cristallin hexagonal et son groupe spatial est  $P6m2$  (186).

###### **Paramètres du réseau :**

$a = 0,2906 \text{ nm} \pm 0,0001 \text{ nm}$

$c = 0,2837 \text{ nm} \pm 0,0001 \text{ nm}$

Le rapport  $c/a$  est d'environ 0,976, ce qui indique que le réseau présente une isotropie élevée.

###### **Caractéristiques des cellules unitaires**

Chaque maille élémentaire contient une molécule de WC. Les atomes de tungstène (W) et de carbone (C) sont disposés selon une structure hexagonale compacte. Les atomes de W sont situés aux sommets et au centre du prisme hexagonal, tandis que les atomes de C remplissent les espaces vides du prisme hexagonal pour former une liaison mixte covalente-ion-métal stable.

###### **Stabilité cristalline**

La structure hexagonale confère au WC une excellente résistance à la déformation, notamment dans des conditions de température et de pression élevées ( $> 1000^\circ\text{C} \pm 10^\circ\text{C}$ ,  $> 200 \text{ MPa} \pm 10 \text{ MPa}$ ), avec un taux de distorsion du réseau de  $< 0,01\% \pm 0,001\%$ , ce qui le rend adapté aux applications dans des environnements extrêmes.

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

## (2) Densité de la poudre de carbure de tungstène

Densité théorique :  $15,63 \text{ g/cm}^3 \pm 0,05 \text{ g/cm}^3$ , proche de la valeur maximale théorique, reflétant la disposition étroite des atomes de WC.

### Densité apparente de la poudre de carbure de tungstène :

Définition : La densité de la poudre dans son état d'empilement naturel, reflétant l'efficacité d'empilement des particules.

Valeur :  $6,0-8,0 \text{ g/cm}^3 \pm 0,2 \text{ g/cm}^3$  (GB/T 1479.1-2011), affectée par la taille et la morphologie des particules.

WC submicronique ( $0,1-0,5 \mu\text{m} \pm 0,01 \mu\text{m}$ ) : La densité apparente est plus faible ( $6,0-6,5 \text{ g/cm}^3 \pm 0,2 \text{ g/cm}^3$ ) en raison des grands espaces entre les particules fines.

WC de qualité micronique ( $1-5 \mu\text{m} \pm 0,01 \mu\text{m}$ ) : masse volumique apparente  $6,5-7,5 \text{ g/cm}^3 \pm 0,2 \text{ g/cm}^3$ .

WC grossier ( $5-10 \mu\text{m} \pm 0,01 \mu\text{m}$ ) : La densité apparente est plus élevée ( $7,5-8,0 \text{ g/cm}^3 \pm 0,2 \text{ g/cm}^3$ ) car les particules sont plus densément compactées.

Impact : La masse volumique apparente influence la masse volumique initiale du corps pressé. Le WC à grains fins nécessite l'ajout de lubrifiants (comme la paraffine) pour améliorer la fluidité ( $< 30 \text{ s/50 g} \pm 2 \text{ s}$ , GB/T 1482-2010).

### Densité de tassement de la poudre de carbure de tungstène :

Définition : La densité de la poudre après vibration (fréquence de vibration  $60 \text{ fois/min} \pm 5 \text{ fois/min}$ ), qui reflète l'efficacité maximale de compactage des particules.

Valeur :  $8,5-10,5 \text{ g/cm}^3 \pm 0,2 \text{ g/cm}^3$  (GB/T 5162-2014).

WC submicronique :  $8,5-9,0 \text{ g/cm}^3 \pm 0,2 \text{ g/cm}^3$ .

WC de qualité micronique :  $9,0-10,0 \text{ g/cm}^3 \pm 0,2 \text{ g/cm}^3$ .

WC grossier :  $10,0-10,5 \text{ g/cm}^3 \pm 0,2 \text{ g/cm}^3$ .

Impact : La densité de tassement est plus proche de la densité après frittage ( $> 99 \% \pm 0,1 \%$ ), et une densité de tassement élevée réduit le retrait de frittage ( $< 15 \% \pm 2 \%$ ).

Densité réelle : La densité mesurée après frittage est de  $15,50-15,60 \text{ g/cm}^3 \pm 0,05 \text{ g/cm}^3$  (méthode de drainage GB/T 3850-2015), qui est affectée par la pureté (carbone libre  $< 0,1 \% \pm 0,01 \%$ , oxyde  $< 0,05 \% \pm 0,01 \%$ ) et la porosité ( $< 0,05 \% \pm 0,01 \%$ ).

Importance de l'application : La densité apparente et la densité de taraudage élevées garantissent l'uniformité du processus de pressage et de frittage et soutiennent la résistance à la compression et aux chocs élevée du carbure cémenté.

## (3) Point de fusion de la poudre de carbure de tungstène

Point de fusion :  $2870^\circ\text{C} \pm 10^\circ\text{C}$ . Le WC ne fond pas sous pression normale, mais se décompose en W et C. La température de décomposition est proche du point de fusion.

Stabilité à haute température : à  $2000^\circ\text{C} \pm 10^\circ\text{C}$ , la dilatation thermique du réseau est  $< 0,5\% \pm 0,1\%$  et le taux de perte de poids est  $< 0,01\% \pm 0,002\%/h$ , ce qui convient à la découpe à haute température ( $> 1000^\circ\text{C} \pm 10^\circ\text{C}$ ) et aux applications de revêtement résistant à l'usure.

### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

Comportement de décomposition : Sous vide ou sous atmosphère réductrice ( $H_2$ ), le taux de décomposition est  $< 0,001 \text{ mg/cm}^2 \cdot \text{h} \pm 0,0002 \text{ mg/cm}^2 \cdot \text{h}$ , indiquant une stabilité chimique.

#### (4) Conductivité thermique de la poudre de carbure de tungstène

Conductivité thermique :  $84 \text{ W}/(\text{m} \cdot \text{K}) \pm 5 \text{ W}/(\text{m} \cdot \text{K})$ , légèrement inférieure à celle du tungstène pur ( $174 \text{ W}/(\text{m} \cdot \text{K}) \pm 5 \text{ W}/(\text{m} \cdot \text{K})$ ), mais meilleure que la plupart des matériaux céramiques.

Dépendance à la température : Dans la plage de  $25$  à  $1\,000 \text{ }^\circ\text{C} \pm 10 \text{ }^\circ\text{C}$ , la conductivité thermique diminue lentement avec l'augmentation de la température (environ  $10\% \pm 2\%$ ), et reste toujours à  $75 \text{ W}/(\text{m} \cdot \text{K}) \pm 5 \text{ W}/(\text{m} \cdot \text{K})$  à  $1\,000 \text{ }^\circ\text{C} \pm 10 \text{ }^\circ\text{C}$ .

Importance de l'application : une conductivité thermique élevée permet de dissiper rapidement la chaleur, de réduire les dommages thermiques aux outils ou aux moules lors de la coupe à grande vitesse ( $> 300 \text{ m/min} \pm 10 \text{ m/min}$ ) et de prolonger la durée de vie ( $> 12 \text{ heures} \pm 1 \text{ heure}$ ).

#### (5) Coefficient de dilatation thermique de la poudre de carbure de tungstène

Coefficient de dilatation thermique linéaire :  $5,2 \times 10^{-6} \text{ K}^{-1} \pm 0,2 \times 10^{-6} \text{ K}^{-1}$  ( $25\text{-}1000^\circ\text{C} \pm 10^\circ\text{C}$ ).

Dépendance à la température : À  $1000^\circ\text{C} \pm 10^\circ\text{C}$ , le taux de dilatation est  $< 0,52\% \pm 0,02\%$ , ce qui est bien inférieur à celui de l'acier ( $12 \times 10^{-6} \text{ K}^{-1} \pm 0,5 \times 10^{-6} \text{ K}^{-1}$ ), assurant une stabilité dimensionnelle à haute température.

Correspondance : Le coefficient de dilatation thermique est proche de celui de la phase de liaison Co ( $5,0 \times 10^{-6} \text{ K}^{-1} \pm 0,2 \times 10^{-6} \text{ K}^{-1}$ ) ou Ni ( $6,0 \times 10^{-6} \text{ K}^{-1} \pm 0,2 \times 10^{-6} \text{ K}^{-1}$ ), réduisant la contrainte résiduelle après frittage ( $< 50 \text{ MPa} \pm 10 \text{ MPa}$ ).

#### (6) Morphologie de la poudre de carbure de tungstène

Morphologie des particules : la poudre WC est polygonale ou presque sphérique, avec des bords  $< 0,05 \text{ } \mu\text{m} \pm 0,01 \text{ } \mu\text{m}$  et une rugosité de surface  $R_a < 0,1 \text{ } \mu\text{m} \pm 0,02 \text{ } \mu\text{m}$  (observation SEM).

Influence morphologique :

La morphologie polygonale augmente la surface de contact des particules ( $> 90\% \pm 2\%$ ) et améliore la résistance de la liaison par frittage ( $> 400 \text{ MPa} \pm 10 \text{ MPa}$ ).

Les bords fins réduisent l'agglomération ( $< 5\% \pm 1\%$ ), améliorent la fluidité ( $< 30 \text{ s}/50 \text{ g} \pm 2 \text{ s}$ , GB/T 1482-2010) et conviennent à la fabrication additive.

Influence de la préparation : La méthode de carbonisation ( $1450\text{-}1600^\circ\text{C} \pm 10^\circ\text{C}$ ) produit des particules polygonales aux bords tranchants ; la méthode plasma produit des particules presque sphériques (rondeur  $> 0,9 \pm 0,01$ ).

#### (7) Surface spécifique de la poudre de carbure de tungstène

Surface spécifique :  $0,5\text{-}5 \text{ m}^2/\text{g} \pm 0,2 \text{ m}^2/\text{g}$ , selon la granulométrie.

WC submicronique ( $0,1\text{-}0,5 \text{ } \mu\text{m} \pm 0,01 \text{ } \mu\text{m}$ ) : surface spécifique  $> 3 \text{ m}^2/\text{g} \pm 0,2 \text{ m}^2/\text{g}$ .

Micron WC ( $1\text{-}5 \text{ } \mu\text{m} \pm 0,01 \text{ } \mu\text{m}$ ) : surface spécifique  $1\text{-}2 \text{ m}^2/\text{g} \pm 0,2 \text{ m}^2/\text{g}$ .

Méthode de mesure : méthode BET (GB/T 19587-2017), quantité d'adsorption  $< 0,5 \text{ cm}^3/\text{g} \pm 0,05 \text{ cm}^3/\text{g}$ .

Importance de l'application : La surface spécifique élevée améliore l'activité de frittage (taux de retrait  $> 15\% \pm 2\%$ ) et améliore la densité du carbure cémenté ( $> 99\% \pm 0,1\%$ ).

#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

### **(8) Propriétés électriques de la poudre de carbure de tungstène**

Résistivité :  $0,2 \mu\Omega \cdot m \pm 0,02 \mu\Omega \cdot m$  ( $25^{\circ}C$ ), augmente d'environ  $20\% \pm 2\%$  lorsque la température monte à  $1000^{\circ}C \pm 10^{\circ}C$ .

Conductivité électrique : Meilleure que les matériaux céramiques (résistivité  $> 10^6 \mu\Omega \cdot m$ ), proche du tungstène métallique ( $0,05 \mu\Omega \cdot m \pm 0,01 \mu\Omega \cdot m$ ), adaptée à l'EDM.

Application : Dans le traitement EDM, la rugosité de surface  $Ra < 1 \mu m \pm 0,2 \mu m$ , la précision  $< 0,01 mm \pm 0,002 mm$ .

### **(9) Autres caractéristiques de la poudre de carbure de tungstène**

Magnétisme : Le WC lui-même n'est pas magnétique, mais lorsqu'il est mélangé au Co, il présente un faible magnétisme (intensité de magnétisation à saturation  $< 0,1 A \cdot m^2 / kg \pm 0,01 A \cdot m^2 / kg$ ), ce qui facilite la séparation magnétique des impuretés.

Brillance : Lustre métallique gris-noir, réflectivité  $< 20 \% \pm 2 \%$  (400-700 nm), utilisé pour l'inspection visuelle.

Hygroscopicité : Taux d'absorption d'humidité  $< 0,01 \% \pm 0,002 \%$  ( $25^{\circ}C$ , 50 % HR), doit être stocké dans un récipient scellé.

### **des caractéristiques de la poudre de carbure de tungstène et de son application**

Structure cristalline et conductivité thermique : Le système cristallin hexagonal et la conductivité thermique élevée permettent de réaliser des moules résistants à l'usure (déformation  $< 0,01 mm \pm 0,002 mm$ ) et des revêtements haute température ( $> 1000^{\circ}C \pm 10^{\circ}C$ ).

Densité et coefficient de dilatation thermique : Une densité de tassement élevée et une faible dilatation thermique optimisent les performances de frittage (densité  $> 99 \% \pm 0,1 \%$ ) et améliorent la qualité des pièces fabriquées de manière additive ( $Ra < 5 \mu m \pm 1 \mu m$ ).

Morphologie et surface spécifique : La morphologie polygonale et la surface spécifique élevée améliorent l'activité de frittage et conviennent aux outils de coupe ( $> 300 m/min \pm 10 m/min$ ).

Corrélation de la taille des particules : le WC à grains fins ( $< 0,5 \mu m \pm 0,01 \mu m$ ) améliore la densité de compactage, tandis que le WC à grains grossiers ( $5-10 \mu m \pm 0,01 \mu m$ ) améliore l'efficacité de l'empilement.

### **Test et contrôle des propriétés physiques de la poudre de carbure de tungstène**

#### **Méthodes de mesure et normes :**

##### **densité**

GB/T 3850-2015 Densité théorique,

GB/T 1479.1-2011 Masse volumique apparente,

GB/T 5162-2014 Densité de taraudage,

Structure cristalline (DRX, GB/T 27708-2011),

Morphologie (MEB, GB/T 16594-2008).

#### **Normes de contrôle**

#### **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)

Écart de taille des particules  $< 5 \% \pm 1 \%$  (GB/T 19077.1-2008), la pureté affecte la densité et le carbone libre doit être maintenu  $< 0,1 \% \pm 0,01 \%$ .

Les caractéristiques physiques de la poudre de carbure de tungstène comprennent une structure hexagonale ( $a = 0,2906 \text{ nm} \pm 0,0001 \text{ nm}$ ,  $c = 0,2837 \text{ nm} \pm 0,0001 \text{ nm}$ ), une densité ( en vrac  $6,0-8,0 \text{ g/cm}^3 \pm 0,2 \text{ g/cm}^3$ , taraudée  $8,5-10,5 \text{ g/cm}^3 \pm 0,2 \text{ g/cm}^3$ , théorique  $15,63 \text{ g/cm}^3 \pm 0,05 \text{ g/cm}^3$ ), un point de fusion ( $2870 \text{ }^\circ\text{C} \pm 10 \text{ }^\circ\text{C}$ ), une conductivité thermique ( $84 \text{ W/(m}\cdot\text{K)} \pm 5 \text{ W/(m}\cdot\text{K)}$ ), un faible coefficient de dilatation thermique ( $5,2 \times 10^{-6} \text{ K}^{-1} \pm 0,2 \times 10^{-6} \text{ K}^{-1}$ ), une morphologie polygonale (arêtes  $< 0,05 \text{ }\mu\text{m} \pm 0,01 \text{ }\mu\text{m}$ ) et d'excellentes propriétés électriques. Ces caractéristiques lui confèrent une excellente performance dans les domaines des outils aéronautiques, des foreuses minières, des moules résistants à l'usure et de la fabrication additive. Ses performances sont optimisées en fonction de la granulométrie et de la pureté des particules, offrant ainsi une base solide pour l'application du carbure cémenté.

### **Propriétés chimiques de la poudre de carbure de tungstène (WC)**

En tant que composant principal du carbure cémenté, les propriétés chimiques de la poudre de carbure de tungstène (WC) jouent un rôle essentiel dans sa stabilité et sa durabilité dans les applications industrielles. Voici une description complète des propriétés chimiques de la poudre de WC, couvrant la stabilité chimique, la résistance à la corrosion, la résistance à l'oxydation, la réactivité et d'autres propriétés chimiques connexes, basée sur des données scientifiques et des normes d'application industrielle (telles que la norme GB/T 5124-2017). Date et heure actuelles : 22 mai 2025 à 14h12 HKT.

#### **(1) Stabilité chimique de la poudre de carbure de tungstène**

##### **Stabilité de la température ambiante**

Le WC présente une stabilité chimique extrêmement élevée à température ambiante ( $25 \text{ }^\circ\text{C} \pm 2 \text{ }^\circ\text{C}$ ), ne réagit pas à la plupart des produits chimiques et a un taux de décomposition de  $< 0,0001 \text{ mg/cm}^2 \cdot \text{h} \pm 0,00002 \text{ mg/cm}^2 \cdot \text{h}$ .

##### **Stabilité acide et base**

Dans les solutions avec un pH de 2 à 12 (comme HCl, NaOH), le taux de corrosion est  $< 0,001 \text{ mm/an} \pm 0,0002 \text{ mm/an}$ , indiquant son excellente résistance aux environnements acides et alcalins.

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

Dans un environnement sans oxygène à  $< 600 \text{ }^\circ\text{C} \pm 10 \text{ }^\circ\text{C}$ , le WC reste stable sans modification chimique significative à la surface (taux de perte de poids  $< 0,005 \% \pm 0,001 \%/h$ ). Dans une atmosphère inerte (telle que Ar ou  $\text{N}_2$ , pureté  $> 99,99 \% \pm 0,01 \%$ ), la stabilité peut être maintenue jusqu'à  $2\ 000 \text{ }^\circ\text{C} \pm 10 \text{ }^\circ\text{C}$ .

#### **(2) Résistance à la corrosion de la poudre de carbure de tungstène**

##### **Environnement acide**

Dans un acide dilué (tel que  $10 \% \text{ HCl}$  ou  $\text{H}_2\text{SO}_4$ ,  $\text{pH } 2 \pm 0,1$ ), le taux de corrosion du WC est  $< 0,001 \text{ mm/an} \pm 0,0002 \text{ mm/an}$ , et il n'y a pas de piqûres évidentes sur la surface (observation SEM, profondeur des piqûres  $< 0,01 \text{ }\mu\text{m} \pm 0,002 \text{ }\mu\text{m}$ ).

##### **Environnement alcalin**

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

Dans une solution de NaOH à 10 % (pH 12 ± 0,1), le taux de corrosion est < 0,002 mm/an ± 0,0005 mm/an, ce qui indique une bonne résistance aux alcalis.

#### **solution saline**

Dans une solution à 3,5 % de NaCl (environnement d'eau de mer simulé), le taux de corrosion est < 0,003 mm/an ± 0,0005 mm/an, ce qui convient aux environnements résistants à la corrosion (tels que les équipements chimiques).

#### **Importance de l'application**

L'excellente résistance à la corrosion rend la poudre WC adaptée aux pièces résistantes à l'usure dans des conditions acides ou alcalines, telles que les joints de pompes chimiques (durée de vie > 5000 heures ± 500 heures).

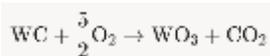
### **(3) Oxydabilité de la poudre de carbure de tungstène**

Capacité antioxydante

L'enthalpie de résistance à l'oxydation du WC est <800 kJ/mol±20 kJ/mol et il s'oxyde difficilement dans l'air à <600°C±10°C (taux d'oxydation <0,01 mg/cm<sup>2</sup> · h ± 0,002 mg/cm<sup>2</sup> · h) .

Oxydation à haute température

À >600°C±10°C dans l'air, le WC s'oxyde lentement pour former du WO<sub>3</sub> (oxyde jaune) avec la formule réactionnelle suivante :



600°C±10°C

Taux d'oxydation : 0,01-0,05 mg/cm<sup>2</sup> · h ± 0,005 mg/cm<sup>2</sup> · h, épaisseur de la couche d'oxyde : < 0,1 μm ± 0,02 μm .

1000°C±10°C

Le taux d'oxydation a augmenté jusqu'à 0,5 mg/cm<sup>2</sup> · h ± 0,05 mg/cm<sup>2</sup> · h et l'épaisseur de la couche d'oxyde était de 1 à 2 μm ± 0,2 μm .

Contrôle de l'atmosphère

En atmosphère réductrice (H<sub>2</sub> , O<sub>2</sub> < 10 ppm±1 ppm) ou sous vide (<10<sup>-2</sup>Pa ± 10<sup>-3</sup> Pa) , le taux d'oxydation est <0,001 mg/cm<sup>2</sup> · h ± 0,0002 mg/cm<sup>2</sup> · h, ce qui convient au traitement à haute température.

Importance de l'application

Une exposition prolongée à un environnement oxydant à haute température (par exemple, un air > 600 °C ± 10 °C) doit être évitée. Un revêtement (par exemple, TiN ) ou une protection sous atmosphère inerte (par exemple, Ar ) sont couramment utilisés pour prolonger la durée de vie.

### **(4) Réactivité de la poudre de carbure de tungstène**

Avec des oxydants puissants

réagit avec des oxydants forts (tels que HNO<sub>3</sub> ou H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> concentrés ) pour produire WO<sub>3</sub> , et la vitesse de réaction augmente avec l'augmentation de la concentration et de la température :

25°C±2°C, 10% HNO<sub>3</sub> : Taux de réaction <0,01 mg/cm<sup>2</sup> · h ± 0,002 mg/cm<sup>2</sup> · h.

80°C±2°C, 30% HNO<sub>3</sub> : vitesse de réaction 0,1-0,5 mg/cm<sup>2</sup> · h ± 0,05 mg/cm<sup>2</sup> · h.

Avec du métal

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

Lors du frittage à haute température ( $> 1200\text{ °C} \pm 10\text{ °C}$ ), le WC réagit avec la phase liante (comme le Co ou le Ni) pour former une solution solide (comme le  $\text{Co}_3\text{W}_3\text{C}$  ou le  $\text{Ni}_3\text{W}_3\text{C}$ ). Le degré de réaction est contrôlé par l'atmosphère :

Atmosphère d'hydrogène ( $\text{H}_2$ ) : taux de réaction  $< 0,1\% \pm 0,02\%/h$ , la proportion de phase  $\eta$  ( $\text{Co}_3\text{W}_3\text{C}$ ) générée est  $< 0,5\% \pm 0,1\%$ .

Atmosphère sous vide : la vitesse de réaction est réduite à  $< 0,05\% \pm 0,01\%/h$ , réduisant la formation de phase  $\eta$ .

Avec non-métal

Le WC réagit avec le carbone (C) à haute température pour générer du  $\text{W}_2\text{C}$  (faible dureté,  $\text{HV} < 2000 \pm 50$ ), et la teneur en carbone doit être contrôlée (rapport molaire W:C 1:  $1,02 \pm 0,01$ ).

Importance de l'application

Pendant le processus de frittage, l'atmosphère ( $\text{O}_2 < 10\text{ ppm} \pm 1\text{ ppm}$ ) et la teneur en carbone (carbone libre  $< 0,1\% \pm 0,01\%$ ) doivent être strictement contrôlées pour éviter une dégradation des performances.

### (5) Caractéristiques de liaison chimique de la poudre de carbure de tungstène

Type de liaison : La liaison WC dans WC est une liaison mixte covalente-ionique-métal avec une énergie de liaison d'environ  $8,6\text{ eV} \pm 0,1\text{ eV}$ .

Longueur de liaison : la longueur de liaison WC est de  $0,219\text{ nm} \pm 0,001\text{ nm}$ , ce qui confère une résistance de liaison et une stabilité chimique élevées.

Structure électronique : Les orbitales 5d de W et les orbitales 2p de C s'hybrident pour former des liaisons covalentes fortes, avec une densité électronique d'environ  $0,8\text{ e}/\text{Å}^3 \pm 0,05\text{ e}/\text{Å}^3$  (calcul DFT), ce qui entraîne une dureté et une résistance à la corrosion élevées.

Importance de l'application : Les fortes caractéristiques de liaison garantissent la stabilité du WC dans les environnements chimiques extrêmes et conviennent aux outils hautement résistants à la corrosion (tels que les moules chimiques).

### (6) Activité chimique de surface de la poudre de carbure de tungstène

Énergie de surface : L'énergie de surface de la poudre WC est de  $1,5\text{ à }2,0\text{ J/m}^2 \pm 0,2\text{ J/m}^2$  (calculée par la méthode BET), qui augmente à mesure que la taille des particules diminue.

Niveau submicronique ( $0,1\text{-}0,5\text{ }\mu\text{m} \pm 0,01\text{ }\mu\text{m}$ ) : énergie de surface  $\sim 2,0\text{ J/m}^2 \pm 0,2\text{ J/m}^2$ .

Niveau micrométrique ( $1\text{-}5\text{ }\mu\text{m} \pm 0,01\text{ }\mu\text{m}$ ) : énergie de surface  $\sim 1,5\text{ J/m}^2 \pm 0,2\text{ J/m}^2$ .

Adsorption : L'adsorption de la poudre WC pour  $\text{O}_2$  et  $\text{H}_2\text{O}$  est  $< 0,01\text{ mg/g} \pm 0,002\text{ mg/g}$  ( $25\text{ °C}$ ,  $50\% \text{ HR}$ ), indiquant une faible activité de surface.

Importance de l'application : une faible activité de surface réduit l'oxydation de la poudre pendant le stockage et le traitement (oxyde  $< 0,05\% \pm 0,01\%$ ), mais des additifs (tels que VC,  $0,1\% - 0,5\% \pm 0,01\%$ ) sont nécessaires pour réduire l'énergie de surface afin de contrôler la croissance des grains.

### (7) Autres propriétés chimiques de la poudre de carbure de tungstène

volatilité

Le WC n'a pas de volatilité évidente à  $< 2000\text{ °C} \pm 10\text{ °C}$  (taux de volatilité  $< 0,001\% \pm 0,0002\%/h$ ) et commence à décomposer et à volatiliser les vapeurs de CO et de W à  $> 2500\text{ °C} \pm 10\text{ °C}$ .

#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

### Solubilité

Insoluble dans l'eau (solubilité  $< 0,001 \text{ g/L} \pm 0,0002 \text{ g/L}$ ) et dans la plupart des solvants organiques (tels que l'éthanol, l'acétone), avec une solubilité  $< 0,002 \text{ g/L} \pm 0,0005 \text{ g/L}$ .

### toxicité

La poudre de WC n'est pas toxique ( $DL50 > 5\,000 \text{ mg/kg}$ ), mais l'inhalation de particules fines ( $< 0,5 \mu\text{m} \pm 0,01 \mu\text{m}$ ) peut provoquer une irritation pulmonaire et un équipement de protection doit être porté.

## Association globale d'impact et d'application

### Stabilité chimique et résistance à la corrosion

La stabilité élevée permet l'application du WC dans des environnements acides et alcalins, tels que les joints d'équipements chimiques (durée de vie  $> 5000 \text{ heures} \pm 500 \text{ heures}$ ).

### Oxydation et réactivité

L'oxydation à haute température et la formation de phase  $\eta$  doivent être contrôlées et conviennent au traitement à haute température ( $> 1000 \text{ }^\circ\text{C} \pm 10 \text{ }^\circ\text{C}$ ) sous atmosphère inerte, comme les outils d'aviation.

### Liaisons chimiques et activité de surface

Des liaisons fortes et une faible activité de surface garantissent une stabilité de stockage à long terme (oxydes  $< 0,05 \% \pm 0,01 \%$ ) et conviennent aux revêtements résistants à l'usure (force de liaison  $> 70 \text{ MPa} \pm 5 \text{ MPa}$ ).

### Adaptabilité environnementale

La faible solubilité et la volatilité soutiennent la fiabilité du WC dans diverses conditions de travail, telles que les forêts minières (durée de vie  $> 1\,000 \text{ m} \pm 100 \text{ m}$ ).

## Détection et contrôle de la poudre de carbure de tungstène

Méthodes de mesure : taux de corrosion (GB/T 4335-2013), taux d'oxydation (GB/T 5124-2017 Méthode d'analyse chimique), énergie de surface (BET, GB/T 19587-2017), volatilité (TG-DSC, GB/T 17137-1997).

Normes de contrôle : carbone libre  $< 0,1 \% \pm 0,01 \%$ , oxyde  $< 0,05 \% \pm 0,01 \%$ , contrôle de l'atmosphère ( $\text{O}_2 < 10 \text{ ppm} \pm 1 \text{ ppm}$ ).

Français Les propriétés chimiques de la poudre de carbure de tungstène comprennent une stabilité chimique élevée (taux de corrosion  $< 0,001 \text{ mm/an} \pm 0,0002 \text{ mm/an}$ ), une excellente résistance à la corrosion (pH 2-12), une résistance à l'oxydation ( $< 600 \text{ }^\circ\text{C} \pm 10 \text{ }^\circ\text{C}$  taux d'oxydation  $< 0,01 \text{ mg/cm}^2 \cdot \text{h} \pm 0,002 \text{ mg/cm}^2 \cdot \text{h}$ ), une réactivité limitée (nécessité de contrôler la formation de la phase  $\eta$  et  $\text{W}_2\text{C}$ ), une forte liaison WC (énergie de liaison  $\sim 8,6 \text{ eV} \pm 0,1 \text{ eV}$ ), une faible activité de surface (énergie de surface  $1,5\text{-}2,0 \text{ J/m}^2 \pm 0,2 \text{ J/m}^2$ ) et une faible volatilité et solubilité. Ces caractéristiques lui confèrent de bonnes performances dans les équipements chimiques, les revêtements résistants à l'usure, les outils aéronautiques et les foreuses minières, et l'optimisation des propriétés chimiques garantit l'application haute performance du carbure cémenté.

## Production et préparation de poudre de carbure de tungstène - procédé de préparation par carburation (1450-1600°C)

### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

### Principe du processus

La méthode de carburation est la méthode de préparation la plus couramment utilisée dans l'industrie. Elle consiste à produire du WC par réaction à haute température de poudre de tungstène (W) et de noir de carbone (C). La formule de réaction est la suivante :  $W+C \rightarrow WC$

La réaction est réalisée à haute température, de 1450 à 1600 °C  $\pm$  10 °C, généralement sous atmosphère d'hydrogène (H<sub>2</sub>) ou sous vide. Thermodynamiquement, l'énergie libre de Gibbs de la réaction est négative ( $\Delta G < -38$  kJ/mol  $\pm$  2 kJ/mol), ce qui assure la réaction spontanée ; cinétiquement, les atomes de carbone pénètrent dans le réseau de tungstène par diffusion à l'état solide (coefficient de diffusion  $\sim 10^{-10}$  cm<sup>2</sup>/s  $\pm$   $10^{-11}$  cm<sup>2</sup>/s), formant progressivement des grains de WC.

### Paramètres du processus :

matière première:

Poudre de tungstène : pureté >99,9 %  $\pm$  0,01 %, taille des particules 0,5-5  $\mu$ m  $\pm$  0,01  $\mu$ m .

Noir de carbone : pureté > 99,5 %  $\pm$  0,01 %, taille des particules < 0,1  $\mu$ m  $\pm$  0,01  $\mu$ m .

### Conditions de réaction :

Température : 1450-1600°C  $\pm$  10°C.

Atmosphère : hydrogène (H<sub>2</sub>, pureté >99,99%  $\pm$  0,01%, débit 50 L/min  $\pm$  5 L/min) ou vide (< 10<sup>-2</sup> Pa  $\pm$  10<sup>-3</sup> Pa) .

Vitesse de chauffage : 5-10°C/min  $\pm$  0,5°C/min.

Temps de maintien : 2 à 4 heures  $\pm$  0,1 heure.

### équipement:

Four graphite : puissance >100 kW  $\pm$  10 kW, tenue en température >1800°C  $\pm$  10°C.

Four fixe ou rotatif : Vitesse du four rotatif 5 tr/min  $\pm$  0,5 tr/min pour améliorer l'uniformité du mélange.

### Optimisation des processus :

#### Sélection de la température :

1450°C  $\pm$  10°C : Produit du WC submicronique (<0,5  $\mu$ m  $\pm$  0,01  $\mu$ m) , avec une dureté augmentée de 5%  $\pm$  1% (HV >2900  $\pm$  50), adapté aux outils de haute précision.

1600°C  $\pm$  10°C : Produit du WC grossier (5-10  $\mu$ m  $\pm$  0,01  $\mu$ m) , augmente le rendement de 10 %  $\pm$  2 % (>12 t/lot  $\pm$  1 t) et convient aux forets à haute ténacité.

### Améliorations de l'équipement :

Le four rotatif améliore l'uniformité de la taille des particules (écart < 5 %  $\pm$  1 %) grâce au mélange dynamique et augmente le rendement de 5 %  $\pm$  1 %, ce qui est meilleur que le four fixe (taux d'agglomération > 10 %  $\pm$  2 %).

### Contrôle de l'atmosphère :

#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

Une atmosphère d'hydrogène ( $O_2 < 10 \text{ ppm} \pm 1 \text{ ppm}$ ) inhibe l'oxydation (oxydes  $< 0,03 \% \pm 0,01 \%$ ) et augmente la pureté de  $1 \% \pm 0,2 \%$ .

L'atmosphère sous vide réduit la volatilisation du carbone (perte  $< 0,1 \% \pm 0,01 \%$ ) et augmente le rendement de  $2 \% \pm 0,5 \%$ .

#### **Analyse des facteurs d'influence :**

##### **Rapport matière première :**

Le rapport molaire E:C est contrôlé à  $1:1,02 \pm 0,01$ . Un excès de carbone ( $> 1,05$ ) conduit à du carbone libre ( $> 0,2 \% \pm 0,01 \%$ ), ce qui réduit la dureté de  $3 \% \pm 0,5 \%$  ( $HV < 2700 \pm 50$ ) ; un manque de carbone ( $< 0,98$ ) génère du  $W_2C$  (dureté  $HV < 2000 \pm 50$ ), et la résistance à la flexion diminue de  $5 \% \pm 1 \%$  ( $< 3800 \text{ MPa} \pm 100 \text{ MPa}$ ).

##### **Température de réaction :**

La plage optimale est de  $1450$  à  $1600 \text{ }^\circ\text{C} \pm 10 \text{ }^\circ\text{C}$ . Au-dessus de  $1650 \text{ }^\circ\text{C} \pm 10 \text{ }^\circ\text{C}$ , la croissance des grains ( $> 10 \text{ } \mu\text{m} \pm 0,01 \text{ } \mu\text{m}$ ) est induite et la dureté diminue de  $5 \% \pm 1 \%$  ; en dessous de  $1400 \text{ }^\circ\text{C} \pm 10 \text{ }^\circ\text{C}$ , la réaction est incomplète (rendement  $< 95 \% \pm 1 \%$ ) et la pureté diminue de  $2 \% \pm 0,5 \%$ .

##### **Contrôle de l'atmosphère :**

L'atmosphère d'hydrogène ( $O_2 < 10 \text{ ppm} \pm 1 \text{ ppm}$ ) inhibe efficacement l'oxydation ; l'atmosphère sous vide réduit la volatilisation du carbone.

Taille des particules de la matière première :

La poudre de tungstène  $< 1 \text{ } \mu\text{m} \pm 0,01 \text{ } \mu\text{m}$  produit du WC submicronique ( $< 0,5 \text{ } \mu\text{m} \pm 0,01 \text{ } \mu\text{m}$ ) avec une dureté de  $HV 3000 \pm 50$  ;  $> 5 \text{ } \mu\text{m} \pm 0,01 \text{ } \mu\text{m}$  produit du WC grossier ( $5-10 \text{ } \mu\text{m} \pm 0,01 \text{ } \mu\text{m}$ ) avec une augmentation de la ténacité de  $10 \% \pm 2 \%$  ( $K_{1c} > 18 \text{ MPa} \cdot \text{m}^{1/2} \pm 0,5$ ).

##### **Performances de l'équipement :**

Le four rotatif (vitesse  $5 \text{ tr/min} \pm 0,5 \text{ tr/min}$ ) a réduit l'agglomération ( $< 5 \% \pm 1 \%$ ), ce qui était mieux que le four fixe (agglomération  $> 10 \% \pm 2 \%$ , réduction de pureté  $1 \% \pm 0,2 \%$ ).

#### **Exemples d'applications techniques de la poudre de carbure de tungstène :**

##### **Outils d'aviation**

En utilisant un procédé au four rotatif à  $1450 \text{ }^\circ\text{C} \pm 10 \text{ }^\circ\text{C}$  sous atmosphère  $H_2$ , une poudre de WC de  $0,5 \pm 0,01 \text{ } \mu\text{m}$  est produite, avec une dureté  $HV$  de  $2950 \pm 50$  et une teneur en carbone libre de  $0,08 \% \pm 0,01 \%$ . Elle est utilisée pour la découpe de l'alliage Ti-6Al-4V ( $1000 \text{ }^\circ\text{C}$ , vitesse  $> 200 \text{ m/min} \pm 10 \text{ m/min}$ ), avec une perte par usure de seulement  $0,1 \text{ mm} \pm 0,02 \text{ mm}$  et une durée de vie de  $12 \text{ heures} \pm 1 \text{ heure}$ .

##### **Trépan de forage minier**

En utilisant un procédé à  $1600^\circ\text{C} \pm 10^\circ\text{C}$  et sous atmosphère sous vide, une poudre WC de  $5$  à  $10 \text{ } \mu\text{m} \pm 0,01 \text{ } \mu\text{m}$  est générée, avec une ténacité  $K_{1c} > 20 \text{ MPa} \cdot \text{m}^{1/2} \pm 0,5$  et une durée de vie de forage de roche dure (résistance à la compression  $> 200 \text{ MPa} \pm 10 \text{ MPa}$ )  $> 1000 \text{ m} \pm 100 \text{ m}$ .

##### **Moule résistant à l'usure**

$1-3 \text{ } \mu\text{m} \pm 0,01 \text{ } \mu\text{m}$ , dureté et ténacité équilibrées, matrice de frappe à froid ( $> 10^5$  fois  $\pm 10^4$  fois) déformation  $< 0,01 \text{ mm} \pm 0,002 \text{ mm}$ .

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

#### 4.1.2 Autres méthodes de préparation

##### **Méthode plasma :**

Principe : Utiliser un plasma à haute température ( $> 5000\text{ °C} \pm 100\text{ °C}$ ) pour faire réagir la poudre de tungstène avec du méthane ( $\text{CH}_4$ ) pour générer du WC.

Paramètres du processus :

Puissance plasma :  $50\text{-}100\text{ kW} \pm 10\text{ kW}$ .

Atmosphère : Argon (Ar, pureté  $> 99,99\% \pm 0,01\%$ ).

Vitesse de refroidissement :  $>100\text{ °C/s} \pm 10\text{ °C/s}$ .

Avantages : Génère du WC ultrafin ( $0,1\text{-}0,3\text{ }\mu\text{m} \pm 0,01\text{ }\mu\text{m}$ ) avec une pureté élevée (carbone libre  $< 0,05\% \pm 0,01\%$ ), adapté aux applications haut de gamme.

Application : Outils ultra-durs (tels que forets pour PCB, diamètre de trou  $< 0,1\text{ mm} \pm 0,01\text{ mm}$ ).

##### **Méthode mécanochimique :**

Principe : La poudre de tungstène et le noir de carbone réagissent mécaniquement pour générer du WC grâce à un broyage à billes à haute énergie (vitesse de rotation  $300\text{-}500\text{ tr/min} \pm 10\text{ tr/min}$ ).

Paramètres du processus :

Temps de broyage à boulets :  $20\text{-}50\text{ heures} \pm 1\text{ heure}$ .

Rapport bille/matériau :  $10:1\text{ à }20:1 \pm 0,1$ .

Avantages : Peut générer du WC à l'échelle nanométrique ( $<0,1\text{ }\mu\text{m} \pm 0,01\text{ }\mu\text{m}$ ), dureté  $\text{HV} > 3100 \pm 50$ .

Application : revêtement nano (tel que la pulvérisation de pales d'aviation, force de liaison  $> 80\text{ MPa} \pm 5\text{ MPa}$ ).

##### **Dépôt chimique en phase vapeur (CVD) :**

Principe : Le WC est déposé par réaction de  $\text{WF}_6$  et  $\text{CH}_4$  à  $800\text{-}1000\text{ °C} \pm 10\text{ °C}$ .

Paramètres du processus :

Taux de dépôt :  $0,1\text{-}0,5\text{ }\mu\text{m}/\text{min} \pm 0,01\text{ }\mu\text{m}/\text{min}$ .

Atmosphère : Gaz mixte  $\text{H}_2 / \text{Ar}$ .

Avantages : Haute pureté (carbone libre  $< 0,03\% \pm 0,01\%$ ), adapté au revêtement.

Application : Revêtement résistant à l'usure (aubes de turbine d'aviation, durée de vie  $> 5000\text{ heures} \pm 500\text{ heures}$ ).

#### 4.1.3 Taille des particules de poudre de carbure de tungstène

La poudre de carbure de tungstène (WC) est le matériau de base du carbure cémenté. Ses caractéristiques granulométriques influencent directement les performances et l'efficacité de ce dernier. Voici une analyse complète de la signification, de la portée, de la distribution, de l'impact sur les performances, des technologies de contrôle qualité et des méthodes de détection de la granulométrie, basée sur des données scientifiques et des normes industrielles (telles que la norme GB/T 19077.1-2008). Date et heure actuelles : 22 mai 2025, 14h20 HKT.

##### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

### (1) L'importance de la taille des particules de poudre de carbure de tungstène

Détermination des performances : La granulométrie de la poudre WC est un paramètre clé affectant les performances du carbure cémenté, déterminant directement la dureté, la résistance à l'usure, la ténacité et le comportement au frittage.

La granulométrie fine ( $<0,5 \mu\text{m} \pm 0,01 \mu\text{m}$ ) améliore la dureté ( $\text{HV} > 3000 \pm 50$ ) et la résistance à l'usure, adaptée à l'usinage de haute précision.

La granulométrie grossière ( $5-10 \mu\text{m} \pm 0,01 \mu\text{m}$ ) améliore la ténacité ( $K_{1c} > 20 \text{MPa} \cdot \text{m}^{1/2} \pm 0,5$ ), adaptée aux scénarios à fort impact.

Adaptabilité de mise en œuvre : La granulométrie influence la fluidité ( $< 30 \text{s}/50 \text{g} \pm 2 \text{s}$ , GB/T 1482-2010) et les performances de pressage de la poudre. Le WC à grains fins est adapté à la fabrication additive (rugosité de surface  $R_a < 5 \mu\text{m} \pm 1 \mu\text{m}$ ), tandis que le WC à gros grains est adapté au frittage traditionnel.

Performances de frittage : La distribution uniforme de la taille des particules (écart  $< 5 \% \pm 1 \%$ ) garantit une densité de frittage ( $> 99 \% \pm 0,1 \%$ ), réduit la porosité ( $< 0,05 \% \pm 0,01 \%$ ) et améliore la résistance globale.

Correspondance des applications : Différentes applications nécessitent la correspondance de tailles de particules spécifiques, telles que les outils d'aviation ( $0,1-0,5 \mu\text{m} \pm 0,01 \mu\text{m}$ ) et les forets miniers ( $5-10 \mu\text{m} \pm 0,01 \mu\text{m}$ ).

### (2) Gamme de granulométrie de la poudre de carbure de tungstène

la taille des particules de poudre WC est généralement comprise entre  $0,1$  et  $10 \mu\text{m} \pm 0,01 \mu\text{m}$ .

Classification:

Nanoscale ( $<0,1 \mu\text{m} \pm 0,01 \mu\text{m}$ ) : dureté extrêmement élevée ( $\text{HV} > 3100 \pm 50$ ), utilisée pour l'usinage ultra-précis.

Qualité submicronique ( $0,1-0,5 \mu\text{m} \pm 0,01 \mu\text{m}$ ) : dureté  $\text{HV} 3000 \pm 50$ , adaptée aux outils de haute précision.

Qualité micronique ( $1-5 \mu\text{m} \pm 0,01 \mu\text{m}$ ) : dureté  $\text{HV} 2500-2800 \pm 50$ , ténacité  $K_{1c} 15-20 \text{MPa} \cdot \text{m}^{1/2} \pm 0,5$ , convient à la fabrication de moules.

Nuance grossière ( $5-10 \mu\text{m} \pm 0,01 \mu\text{m}$ ) : ténacité  $K_{1c} > 20 \text{MPa} \cdot \text{m}^{1/2} \pm 0,5$ , adaptée aux forets miniers.

Influence de la préparation : La plage de tailles de particules est déterminée par le processus de préparation, comme la carbonisation ( $1450-1600^\circ\text{C} \pm 10^\circ\text{C}$ ) produit  $0,5-10 \mu\text{m} \pm 0,01 \mu\text{m}$ , et la méthode mécano-chimique produit  $<0,1 \mu\text{m} \pm 0,01 \mu\text{m}$ .

### (3) Distribution granulométrique et qualité de la poudre de carbure de tungstène

Caractéristiques de distribution :

L'analyse granulométrique au laser (GB/T 19077.1-2008) a été utilisée pour mesurer D10, D50 et D90.

Niveau submicronique : D50= $0,3 \mu\text{m} \pm 0,01 \mu\text{m}$ , D10= $0,1 \mu\text{m} \pm 0,01 \mu\text{m}$ , D90= $0,5 \mu\text{m} \pm 0,01 \mu\text{m}$ .  
de microns : D50= $3 \mu\text{m} \pm 0,01 \mu\text{m}$ , D10= $1 \mu\text{m} \pm 0,01 \mu\text{m}$ , D90= $5 \mu\text{m} \pm 0,01 \mu\text{m}$ .

Qualité grossière : D50= $8 \mu\text{m} \pm 0,01 \mu\text{m}$ , D10= $5 \mu\text{m} \pm 0,01 \mu\text{m}$ , D90= $10 \mu\text{m} \pm 0,01 \mu\text{m}$ .

Évaluation des avantages et des inconvénients :

#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

Avantages : distribution étroite (écart  $< 5 \% \pm 1 \%$ ), particules uniformes, densité élevée après frittage ( $> 99 \% \pm 0,1 \%$ ) et bonne constance des performances.

Inconvénients : large distribution (écart  $> 10 \% \pm 2 \%$ ), particules inégales, porosité accrue après frittage ( $> 0,1 \% \pm 0,02 \%$ ), grandes fluctuations de performance (telles qu'un écart de dureté  $> 100$  HV).

Facteurs d'influence : taille des particules de la matière première (poudre de tungstène  $< 0,5 \mu\text{m} \pm 0,01 \mu\text{m}$ ), temps de réaction (2 à 4 heures  $\pm 0,1$  heure), vitesse de refroidissement ( $> 50 \text{ }^\circ\text{C}/\text{min} \pm 5 \text{ }^\circ\text{C}/\text{min}$ ).

#### **(4) Effet de la taille de la poudre de carbure de tungstène sur les performances du carbure cémenté**

Dureté : Plus la taille des particules est petite, plus la dureté est élevée. Le WC submicronique ( $< 0,5 \mu\text{m} \pm 0,01 \mu\text{m}$ ) a une dureté HV  $> 3000 \pm 50$ , ce qui convient aux outils extra-durs (vitesse de coupe  $> 300 \text{ m}/\text{min} \pm 10 \text{ m}/\text{min}$ ).

Ténacité : Plus la taille des particules est importante, meilleure est la ténacité. Le WC grossier ( $5-10 \mu\text{m} \pm 0,01 \mu\text{m}$ ) présente une ténacité  $K_{1c} > 20 \text{ MPa} \cdot \text{m}^{1/2} \pm 0,5$ , adaptée aux forets miniers (résistance à la compression  $> 200 \text{ MPa} \pm 10 \text{ MPa}$ ).

Résistance à l'usure : le WC à grain fin améliore la résistance à l'usure, outil d'aviation ( $0,3 \mu\text{m} \pm 0,01 \mu\text{m}$ ) usure  $< 0,08 \text{ mm} \pm 0,02 \text{ mm}$ , durée de vie  $> 15$  heures  $\pm 1$  heure.

Performances de frittage : distribution uniforme (écart  $< 5 \% \pm 1 \%$ ), porosité réduite ( $< 0,05 \% \pm 0,01 \%$ ) et résistance à la flexion améliorée ( $> 3800 \text{ MPa} \pm 100 \text{ MPa}$ ).

Performances de traitement : Le WC à grains fins améliore l'uniformité de l'étalement de la poudre (fluidité  $< 30 \text{ s}/50 \text{ g} \pm 2 \text{ s}$ ) et convient à l'impression 3D (résistance à la traction  $> 800 \text{ MPa} \pm 50 \text{ MPa}$ ).

Exemple :  $0,5 \mu\text{m} \pm 0,01 \mu\text{m}$  de poudre WC (écart de distribution  $< 3 \% \pm 0,5 \%$ ) est utilisée pour les forets PCB, avec une durée de vie de  $> 10^5$  trous  $\pm 10^4$  trous ;  $8 \mu\text{m} \pm 0,01 \mu\text{m}$  de poudre WC est utilisée pour les forets PDC, avec une vitesse de perçage de  $> 5 \text{ m}/\text{h} \pm 0,5 \text{ m}/\text{h}$ .

#### **(5) Technologie de contrôle de la qualité de la taille des particules de poudre de carbure de tungstène**

Contrôle des matières premières : la taille des particules de poudre de tungstène  $< 0,5 \mu\text{m} \pm 0,01 \mu\text{m}$  génère  $0,1-0,5 \mu\text{m} \pm 0,01 \mu\text{m}$  de WC et la maturation d'Ostwald (taux de croissance  $\sim 10^{-9} \text{ m}/\text{s} \pm 10^{-10} \text{ m}/\text{s}$ ) est inhibée.

Temps de réaction : 2 heures  $\pm 0,1$  heure ( $1450^\circ\text{C} \pm 10^\circ\text{C}$ ) pour générer du WC fin ( $< 0,5 \mu\text{m} \pm 0,01 \mu\text{m}$ ) ; 4 heures  $\pm 0,1$  heure ( $1600^\circ\text{C} \pm 10^\circ\text{C}$ ) pour générer du WC grossier ( $5-10 \mu\text{m} \pm 0,01 \mu\text{m}$ ) .

Vitesse de refroidissement : Un refroidissement rapide ( $> 50 \text{ }^\circ\text{C}/\text{min} \pm 5 \text{ }^\circ\text{C}/\text{min}$ ) inhibe la croissance des grains ( $< 0,01 \mu\text{m}/\text{min} \pm 0,001 \mu\text{m}/\text{min}$ ), avec un écart de  $< 3 \% \pm 0,5 \%$ .

Additifs : Le carbure de vanadium (VC,  $0,1\%-0,5\% \pm 0,01\%$ ) réduit l'énergie de surface ( $< 1 \text{ J}/\text{m}^2 \pm 0,1 \text{ J}/\text{m}^2$ ) et réduit la taille des particules de  $10\% \pm 2\%$  ; Le carbure de chrome ( $\text{Cr}_3\text{C}_2$ ,  $0,5 \% \pm 0,01\%$ ) inhibe la diffusion (coefficient  $< 10^{-11} \text{ cm}^2/\text{s} \pm 10^{-12} \text{ cm}^2/\text{s}$ ), avec un écart de  $< 2 \% \pm 0,5\%$ .

Optimisation des équipements : Four rotatif (vitesse  $5 \text{ tr}/\text{min} \pm 0,5 \text{ tr}/\text{min}$ ) mélange dynamique, uniformité granulométrique améliorée (écart  $< 5\% \pm 1\%$ ).

Post-traitement : Tamisage (taille des pores  $< 10 \mu\text{m} \pm 0,1 \mu\text{m}$ ) pour éliminer les agglomérats

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

(<5%±1%) ; classification du flux d'air (GB/T 19077.1-2008) pour ajuster la distribution, avec un écart de <2%±0,5%.

#### **( 6 ) Méthode de détection de la taille des particules de poudre de carbure de tungstène**

Analyse de la taille des particules au laser : Selon la norme GB/T 19077.1-2008, le diffractomètre laser est utilisé pour mesurer D10, D50 et D90, avec un écart de <5%±1%.

Microscopie électronique à balayage (MEB) : Selon GB/T 16594-2008, observer la morphologie des particules (polygonale, bord < 0,05 μm±0,01 μ m ) et l'agglomération (< 5 %± 1 %).

de sédimentation est mesurée et la distribution granulométrique est estimée. Elle convient aux particules grossières (> 5 μm ± 0,01 μm ) .

Méthode de la surface spécifique : Selon la norme GB/T 19587-2017 (méthode BET), la taille moyenne des particules est calculée. La surface spécifique submicronique est > 3 m<sup>2</sup>/g ± 0,2 m<sup>2</sup>/g.

Surveillance en ligne : Un analyseur de taille de particules laser en ligne est utilisé pendant le processus de production pour contrôler la distribution en temps réel (écart < 3 % ± 0,5 %).

Association globale d'impact et d'application

Optimisation des performances : le WC à grains fins (0,1-0,5 μm±0,01 μ m ) améliore la dureté et la résistance à l'usure, adapté aux outils d'aviation (durée de vie > 15 heures ± 1 heure) ; le WC à grains grossiers (5-10 μm±0,01 μ m ) améliore la ténacité, adapté aux forets miniers (durée de vie > 1000 m±100 m).

Efficacité du contrôle qualité : Le four rotatif et les additifs (VC, Cr<sub>3</sub>C<sub>2</sub> ) assurent une distribution uniforme (écart <5%±1%) et améliorent la consistance du frittage (densité >99%±0,1%).

Fiabilité de la détection : la combinaison de l'analyse granulométrique laser et du MEB fournit des données de distribution et de morphologie précises pour optimiser les paramètres du processus.

Les caractéristiques granulométriques de la poudre de carbure de tungstène sont cruciales pour les performances du carbure cémenté. La plage granulométrique (0,1-10 μm ± 0,01 μm ) couvre les nuances nanométriques à grossières, et sa répartition uniforme (écart < 5 % ± 1 %) garantit des performances constantes. Les particules fines augmentent la dureté, les particules grossières la ténacité, et les technologies de contrôle qualité (contrôle des matières premières , additifs, four rotatif) et de détection (analyse granulométrique laser, MEB) garantissent une granulométrie précise. L'optimisation granulométrique de la poudre de carbure de tungstène offre un support performant pour les outils aéronautiques, les foreuses minières, les moules résistants à l'usure et d'autres domaines.

#### **4.1.4 Pureté de la poudre de carbure de tungstène**

La pureté de la poudre de carbure de tungstène (WC) est l'indicateur clé de son contrôle qualité, qui influence directement les performances, l'aptitude à la transformation et la durée de vie du carbure cémenté. Voici une analyse complète de la définition de la pureté, des principales impuretés, des facteurs d'influence, des stratégies d'optimisation, des méthodes de détection et des effets d'application, basée sur des données scientifiques et des normes industrielles (telles que la norme GB/T 5124-2017). Date et heure actuelles : 22 mai 2025, 14h23 HKT.

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

### (1) Définition et indice de pureté de la poudre de carbure de tungstène

Définition : La pureté de la poudre de WC fait référence à la teneur de son composant principal WC, et la teneur totale en impuretés (carbone libre, oxydes, impuretés métalliques, etc.) doit généralement être aussi faible que possible.

Indicateurs clés :

Carbone libre :  $< 0,1 \% \pm 0,01 \%$ . Une valeur trop élevée réduira la dureté ( $HV < 2\,800 \pm 50$ ) et la densité de frittage ( $< 99 \% \pm 0,1 \%$ ).

Oxyde (tel que  $WO_3$ ) :  $< 0,05 \% \pm 0,01 \%$ . Une concentration trop élevée entraînera une augmentation de la porosité ( $> 0,1 \% \pm 0,02 \%$ ).

Impuretés métalliques (telles que Fe, Cr) :  $< 0,02 \% \pm 0,005 \%$ , pour éviter d'affecter les performances du carbure cémenté.

Pureté de la phase WC :  $> 99,8 \% \pm 0,02 \%$ , garantissant l'absence de  $W_2C$  ou d'autres phases secondaires (faible dureté,  $HV < 2\,000 \pm 50$ ).

### (2) Principales impuretés dans la poudre de carbure de tungstène et leurs sources

#### Carbone libre :

(rapport molaire  $E:C > 1,05 \pm 0,01$ ) ou réaction incomplète (température  $< 1400^\circ C \pm 10^\circ C$ ) lors de la préparation par carbonisation.

Impact : Lorsque le carbone libre  $> 0,2 \% \pm 0,01 \%$ , la dureté diminue de  $3 \% \pm 0,5 \%$  ( $HV < 2\,700 \pm 50$ ), et la porosité augmente après frittage ( $> 0,2 \% \pm 0,02 \%$ ).

#### Oxyde:

Source : Oxydation des matières premières (la poudre de tungstène contient  $O > 0,1 \% \pm 0,01 \%$ ) ou teneur élevée en oxygène dans l'atmosphère pendant le processus de préparation ( $O_2 > 10 \text{ ppm} \pm 1 \text{ ppm}$ ).

Impact : Lorsque la teneur en oxyde est  $> 0,05 \% \pm 0,01 \%$ , la porosité augmente après frittage ( $> 0,1 \% \pm 0,02 \%$ ) et la résistance diminue de  $5 \% \pm 1 \%$  (résistance à la flexion  $< 3\,800 \text{ MPa} \pm 100 \text{ MPa}$ ).

#### Impuretés métalliques :

Source : Usure de l'équipement (comme le Fe introduit par le broyeur à boulets,  $> 0,1 \% \pm 0,01 \%$ ) ou matières premières impures (Cr, Mo, etc.).

Impact : Lorsque  $Fe > 0,02 \% \pm 0,005 \%$ , la dureté diminue de  $2 \% \pm 0,5 \%$  et la résistance à la corrosion diminue (taux de corrosion  $> 0,002 \text{ mm/an} \pm 0,0005 \text{ mm/an}$ ).

### (3) Effet de la pureté de la poudre de carbure de tungstène sur les performances du carbure cémenté

Dureté et résistance à l'usure : Haute pureté (carbone libre  $< 0,1 \% \pm 0,01 \%$ ) garantit une dureté  $HV > 2\,900 \pm 50$ , usure des outils d'aviation  $< 0,08 \text{ mm} \pm 0,02 \text{ mm}$ , durée de vie  $> 15 \text{ heures} \pm 1 \text{ heure}$ .

Ténacité : oxyde  $< 0,03 \% \pm 0,01 \%$  Porosité réduite, ténacité  $K_{IC} > 18 \text{ MPa} \cdot \text{m}^{1/2} \pm 0,5$ , durée de vie du trépan minier  $> 1\,200 \text{ m} \pm 100 \text{ m}$ .

Performances de frittage : haute pureté (phase WC  $> 99,8 \% \pm 0,02 \%$ ), densité améliorée ( $> 99 \% \pm 0,1 \%$ ), résistance à la compression  $> 4\,000 \text{ MPa} \pm 100 \text{ MPa}$ .

#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

Résistance à la corrosion : les impuretés métalliques  $< 0,02 \% \pm 0,005 \%$  garantissent une résistance à la corrosion (pH 2-12, taux de corrosion  $< 0,001 \text{ mm/an} \pm 0,0002 \text{ mm/an}$ ), adaptées aux équipements chimiques.

La poudre avec une teneur en carbone libre de  $0,07 \% \pm 0,01 \%$  et une teneur en oxyde de  $< 0,02 \% \pm 0,005 \%$  est utilisée pour les moules résistants à l'usure, et sa durée de vie est  $> 10^6$  fois  $\pm 10^5$  fois, ce qui est mieux que le WC avec une teneur en carbone libre de  $0,2 \% \pm 0,01 \%$  (durée de vie  $< 8 \times 10^5$  fois  $\pm 10^5$  fois).

#### **(4) Stratégie d'optimisation de la pureté de la poudre de carbure de tungstène**

##### **Contrôle des matières premières :**

Pureté de la poudre de tungstène  $> 99,9 \% \pm 0,01 \%$ , contenant O  $< 0,05 \% \pm 0,01 \%$  ; pureté du noir de carbone  $> 99,5 \% \pm 0,01 \%$ , contenant O  $< 0,03 \% \pm 0,01 \%$ .

Effet : Réduit les oxydes initiaux et les oxydes finis de  $0,02 \% \pm 0,005 \%$ .

##### **Contrôle de la teneur en carbone :**

Le rapport molaire W:C est de  $1:1,01 \pm 0,01$ , assurant une réaction complète, réduisant le carbone libre à  $0,08\% \pm 0,01\%$  et augmentant la dureté de  $2\% \pm 0,5\%$ .

Un excès de carbone ( $> 1,05$ ) produit du graphite ( $> 0,3 \% \pm 0,01 \%$ ), tandis qu'un excès de carbone ( $< 0,98$ ) produit du  $W_2 C$ .

##### **Contrôle de l'atmosphère :**

Atmosphère d'hydrogène ( $H_2$ ,  $O_2 < 10 \text{ ppm} \pm 1 \text{ ppm}$ ) : réduction de  $WO_3$  (taux de réduction  $> 99 \% \pm 1 \%$ ), oxyde  $< 0,03 \% \pm 0,01 \%$ .

Atmosphère sous vide ( $< 10^{-2} \text{ Pa} \pm 10^{-3} \text{ Pa}$ ) : inhibe la volatilisation du carbone et augmente la pureté de  $1 \% \pm 0,2 \%$ .

##### **Post-traitement :**

Tamissage (taille des pores  $< 10 \mu\text{m} \pm 0,1 \mu\text{m}$ ) : élimine les agglomérats ( $< 5\% \pm 1\%$ ) et augmente la pureté de  $0,5\% \pm 0,1\%$ .

Décapage (HCl, pH  $2 \pm 0,1$ ) : élimine le Fe ( $< 0,01\% \pm 0,002\%$ ), augmente la dureté de  $1\% \pm 0,2\%$ .

Améliorations de l'équipement :

Utiliser un four en graphite de haute pureté (contenant C  $< 0,01 \% \pm 0,002 \%$ ) pour réduire la pollution au carbone.

Le four rotatif (vitesse  $5 \text{ tr/min} \pm 0,5 \text{ tr/min}$ ) a amélioré l'uniformité de la réaction et réduit le carbone libre de  $0,02 \% \pm 0,005 \%$ .

#### **(5) Méthode de détection**

Détection de carbone libre : Selon la méthode d'analyse chimique GB/T 5124-2017, la teneur en  $CO_2$  est mesurée après combustion à haute température avec une précision de  $\pm 0,005 \%$ .

La teneur en  $\text{C}$  est déterminée par dissolution acide et titrage, avec une précision de  $\pm 0,002 \%$ .

Détection d'impuretés métalliques : ICP-MS (GB/T 13748.20-2009), détection de Fe, Cr, etc., limite de détection  $< 0,001 \%$ .

Analyse de la pureté de phase : diffraction des rayons X (DRX, GB/T 27708-2011) pour confirmer la pureté de la phase WC et exclure la phase  $W_2C$  ou graphite.

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

Surveillance en ligne : des analyseurs de gaz infrarouges sont utilisés pendant le processus de production pour surveiller les émissions de CO<sub>2</sub> en temps réel et contrôler le carbone libre (<0,1%±0,01%).

Association globale d'impact et d'application

Performances améliorées : La haute pureté (carbone libre < 0,1 % ± 0,01 %, oxyde < 0,05 % ± 0,01 %) garantit une dureté élevée (HV > 2900 ± 50) et une ténacité (K<sub>1c</sub> > 18 MPa·m<sup>1/2</sup> ± 0,5) du carbure cémenté.

Optimisation des procédés : Le contrôle de l'atmosphère et le post-traitement (tel que le décapage) réduisent considérablement les impuretés, adaptés aux applications haut de gamme (outils aérospatiaux, forets miniers).

Fiabilité de la détection : Combinaison de l'analyse chimique et de la DRX pour garantir des données de pureté précises et optimiser les processus de production.

Résumer

La pureté de la poudre de carbure de tungstène repose sur des indicateurs clés tels que le carbone libre (< 0,1 % ± 0,01 %), l'oxyde (< 0,05 % ± 0,01 %) et les impuretés métalliques (< 0,02 % ± 0,005 %), qui influencent directement la dureté, la ténacité, les performances de frittage et la résistance à la corrosion du carbure cémenté. La pureté peut être efficacement améliorée grâce au contrôle des matières premières, à un ratio précis de teneur en carbone, à l'optimisation de l'atmosphère et à la technologie de post-traitement. La méthode de détection (analyse chimique, DRX) garantit une qualité stable. La poudre de carbure de tungstène haute pureté offre d'excellentes performances pour les outils aéronautiques, les moules résistants à l'usure et d'autres domaines.

#### 4.1.5 Teneur en carbone de la poudre de carbure de tungstène

La teneur en carbone de la poudre de carbure de tungstène est un paramètre clé dans sa préparation et l'optimisation de ses performances, qui affecte directement sa stabilité chimique, sa dureté et son comportement au frittage.

##### (1) Définition et indice de teneur en carbone dans la poudre de carbure de tungstène

Définition : La teneur en carbone correspond à la teneur totale en carbone de la poudre de WC, y compris le carbone lié (carbone formant le WC) et le carbone libre (carbone n'ayant pas réagi). La teneur théorique en carbone du WC idéal est de 6,13 % ± 0,01 % (rapport molaire E:C = 1:1).

##### Indicateurs clés de la teneur en carbone de la poudre de carbure de tungstène :

totale en carbone : 6,0 % - 6,2 % ± 0,01 %, y compris le carbone lié et le carbone libre.

Carbone libre : < 0,1 % ± 0,01 %. Une teneur trop élevée réduira la dureté et la densité.

Carbone lié : 5,9 %-6,1 % ± 0,01 %, reflétant le degré de formation de la phase WC.

##### (2) Gamme de teneur en carbone dans la poudre de carbure de tungstène

La fraction massique de carbone correspondant à la formule moléculaire du WC est de 6,13 % ± 0,01 %, c'est-à-dire que 1 mol W (183,84 g) est combiné avec 1 mol C (12,01 g).

Portée réelle :

#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

État à faible teneur en carbone (5,9%-6,0%±0,01%) : une phase  $W_2C$  ( teneur en carbone 3,16%±0,01%) ou W peut être générée et la dureté diminue (HV <2000±50).

Plage normale (6,0%-6,2%±0,01%) : proche de la valeur théorique, adaptée au carbure cimenté hautes performances.

État à haute teneur en carbone (> 6,2 % ± 0,01 %) : le carbone libre augmente (> 0,2 % ± 0,01 %), la dureté diminue (HV < 2700 ± 50) et la porosité augmente (> 0,2 % ± 0,02 %).

Influence de la préparation : La méthode de carbonisation (1450-1600°C±10°C) contrôle le rapport molaire E:C à 1:1,01±0,01 pour garantir une teneur en carbone stable.

### **(3) Effet de la teneur en carbone de la poudre de carbure de tungstène sur les performances du carbure cimenté**

Dureté et résistance à l'usure : la teneur en carbone de 6,0 % à 6,2 % ± 0,01 % garantit une dureté HV > 2900 ± 50, une usure des outils d'aviation < 0,08 mm ± 0,02 mm, une durée de vie > 15 heures ± 1 heure.

C et la ténacité diminue ( $K_{Ic} < 10 \text{ MPa} \cdot \text{m}^{1/2} \pm 0,5$ ) ; une teneur élevée en carbone (>6,2 % ± 0,01 %) en carbone libre réduit la constance de la ténacité.

Propriétés de frittage : la teneur en carbone de 6,1 % ± 0,01 % optimise la densité de frittage (> 99 % ± 0,1 %), la résistance à la compression > 4 000 MPa ± 100 MPa ; le carbone libre > 0,1 % ± 0,01 % conduit à une porosité accrue (> 0,1 % ± 0,02 %).

Résistance à la corrosion : Carbone libre < 0,1 % ± 0,01 % Maintient la résistance à la corrosion (pH 2-12, taux de corrosion < 0,001 mm/an ± 0,0002 mm/an).

La poudre avec une teneur en carbone de 6,08 % ± 0,01 % (carbone libre 0,07 % ± 0,01 %) est utilisée pour les moules résistants à l'usure, et sa durée de vie est > 10<sup>6</sup> fois ± 10<sup>5</sup> fois, ce qui est mieux que le WC avec une teneur en carbone de 6,25 % ± 0,01 % (carbone libre 0,2 % ± 0,01 %) (durée de vie < 8 × 10<sup>5</sup> fois ± 10<sup>5</sup> fois).

### **(4) Stratégie d'optimisation de la teneur en carbone dans la poudre de carbure de tungstène**

#### **Contrôle des matières premières :**

La pureté du noir de carbone est > 99,5 % ± 0,01 % et la taille des particules est < 0,1 μm ± 0,01 μm , garantissant une distribution uniforme du carbone.

La poudre de tungstène contient O < 0,05 % ± 0,01 % , ce qui réduit la réaction d'oxydation et interfère avec la teneur en carbone.

Rapport de teneur en carbone :

Le rapport molaire E:C est de 1:1,01±0,01, avec un léger excès de carbone pour compenser la volatilisation, le carbone lié atteint 6,1%±0,01% et le carbone libre est <0,1%±0,01%.

Un excès de carbone (> 1,05) produit du graphite (> 0,3 % ± 0,01 %) ; un excès de carbone (< 0,98) produit du  $W_2C$  .

#### **Conditions de réaction :**

Température : 1450-1600°C±10°C, réaction terminée, taux de liaison du carbone >98%±1%.

Atmosphère : Hydrogène ( $H_2$  ,  $O_2 < 10 \text{ ppm} \pm 1 \text{ ppm}$ ) ou vide ( $< 10^{-2} \text{ Pa} \pm 10^{-3} \text{ Pa}$ ) , réduisent la volatilisation du carbone (perte <0,1%±0,01 %).

Temps d'isolation : 2 à 4 heures ± 0,1 heure, pour assurer une réaction de carbonisation suffisante.

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

**Post-traitement :**

Traitement thermique ( $800^{\circ}\text{C}\pm 10^{\circ}\text{C}$ , atmosphère  $\text{H}_2$ ) : élimination du carbone libre (réduction de  $0,05\%\pm 0,01\%$ ).

Lavage acide ( $\text{HCl}$ ,  $\text{pH } 2\pm 0,1$ ) : Élimine les impuretés causées par une carbonisation incomplète et augmente la pureté de  $0,5\%\pm 0,1\%$ .

**Optimisation des équipements :**

Le four rotatif (vitesse  $5 \text{ tr/min} \pm 0,5 \text{ tr/min}$ ) améliore l'uniformité du mélange et l'écart de distribution du carbone est  $< 2\% \pm 0,5\%$ .

Le four en graphite de haute pureté (contenant  $\text{C} < 0,01\% \pm 0,002\%$ ) réduit la pollution au carbone exogène.

**(5) Méthode de détection de la teneur en carbone dans la poudre de carbure de tungstène**

totale en carbone : Selon GB/T 5124-2017, méthode d'absorption infrarouge par combustion à haute température, mesure de la teneur en  $\text{CO}_2$ , précision  $\pm 0,005\%$ .

Carbone lié : après combustion à haute température, le carbone libre est séparé par dissolution acide et le carbone restant est du carbone lié avec une précision de  $\pm 0,002\%$ .

Carbone libre : calculé par différence (carbone total - carbone lié), ou méthode de combustion directe, précision  $\pm 0,005\%$ .

Analyse de phase : diffraction des rayons X (DRX, GB/T 27708-2011) pour confirmer la pureté de la phase WC et détecter la phase  $\text{W}_2\text{C}$  ou graphite.

Surveillance en ligne : l'analyseur de gaz infrarouge surveille les émissions de  $\text{CO}_2$  en temps réel et contrôle le carbone libre ( $< 0,1\%\pm 0,01\%$ ).

**Influence globale de la teneur en carbone dans la poudre de carbure de tungstène et sa corrélation avec les applications**

La teneur en carbone libre de  $6,0\%$  à  $6,2\% \pm 0,01\%$  (carbone libre  $< 0,1\% \pm 0,01\%$ ) assure une dureté élevée ( $\text{HV} > 2900 \pm 50$ ) et une ténacité ( $K_{1c} > 18 \text{ MPa}\cdot\text{m}^{1/2} \pm 0,5$ ) du carbure cimenté. Efficacité du processus : le rapport précis et le contrôle de l'atmosphère réduisent l'écart de carbone, adapté aux outils d'aviation (durée de vie  $> 15$  heures  $\pm 1$  heure) et aux moules résistants à l'usure ( $> 10^6$  fois  $\pm 10^5$  fois).

Fiabilité de la détection : La combinaison de l'analyse chimique et de la DRX fournit des données précises sur la teneur en carbone et optimise le processus de production.

La teneur en carbone de la poudre de carbure de tungstène se situe dans la plage idéale de  $6,0\%$  à  $6,2\% \pm 0,01\%$ , avec  $5,9\%$  à  $6,1\% \pm 0,01\%$  de carbone combiné et  $< 0,1\% \pm 0,01\%$  de carbone libre, ce qui est crucial pour la dureté, la ténacité et les performances de frittage. La teneur en carbone peut être ajustée efficacement grâce au contrôle des matières premières, à l'optimisation du rapport E/C, à l'ajustement des conditions de réaction et à la technologie de post-traitement. La méthode de détection (par absorption infrarouge, DRX) garantit une qualité stable. La poudre de carbure de tungstène à teneur en carbone appropriée offre un support performant pour les outils aéronautiques, les forets miniers et d'autres domaines.

**4.1.6 Contrôle de la qualité et test de la taille des particules, de la pureté, de la teneur en**

**COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT**

## **carbone, etc. de la poudre de carbure de tungstène**

La granulométrie, la pureté et la teneur en carbone de la poudre de carbure de tungstène (WC) sont des paramètres clés pour son contrôle qualité, déterminant directement les performances et la fiabilité de son application. Ce document présente une analyse complète de la technologie de contrôle qualité, des méthodes de détection et de leur impact global, basée sur des données scientifiques et des normes industrielles (telles que GB/T 19077.1-2008, GB/T 5124-2017). Date et heure actuelles : 22 mai 2025, 14h32 HKT.

### **(1) Contrôle de la qualité de la granulométrie et test de la poudre de carbure de tungstène**

#### **Technologie de contrôle :**

Contrôle des matières premières : la taille des particules de poudre de tungstène  $< 0,5 \mu\text{m} \pm 0,01 \mu\text{m}$  génère  $0,1-0,5 \mu\text{m} \pm 0,01 \mu\text{m}$  de WC et la maturation d'Ostwald (taux de croissance  $\sim 10^{-9} \text{ m/s} \pm 10^{-10} \text{ m/s}$ ) est inhibée.

Temps de réaction : 2 heures  $\pm 0,1$  heure ( $1450^\circ\text{C} \pm 10^\circ\text{C}$ ) pour générer du WC fin ( $< 0,5 \mu\text{m} \pm 0,01 \mu\text{m}$ ) ; 4 heures  $\pm 0,1$  heure ( $1600^\circ\text{C} \pm 10^\circ\text{C}$ ) pour générer du WC grossier ( $5-10 \mu\text{m} \pm 0,01 \mu\text{m}$ ) .

Vitesse de refroidissement : Un refroidissement rapide ( $> 50^\circ\text{C}/\text{min} \pm 5^\circ\text{C}/\text{min}$ ) inhibe la croissance des grains ( $< 0,01 \mu\text{m}/\text{min} \pm 0,001 \mu\text{m}/\text{min}$ ), avec un écart de  $< 3\% \pm 0,5\%$ .

Additifs : Le carbure de vanadium (VC,  $0,1\%-0,5\% \pm 0,01\%$ ) réduit l'énergie de surface ( $< 1 \text{ J}/\text{m}^2 \pm 0,1 \text{ J}/\text{m}^2$ ) et réduit la taille des particules de  $10\% \pm 2\%$  ; Le carbure de chrome ( $\text{Cr}_3\text{C}_2$ ,  $0,5\% \pm 0,01\%$ ) inhibe la diffusion (coefficient  $< 10^{-11} \text{ cm}^2/\text{s} \pm 10^{-12} \text{ cm}^2/\text{s}$ ), avec un écart de  $< 2\% \pm 0,5\%$ .

Optimisation de l'équipement : Le four rotatif (vitesse  $5 \text{ tr}/\text{min} \pm 0,5 \text{ tr}/\text{min}$ ) améliore l'uniformité du mélange et l'écart de distribution granulométrique est  $< 5\% \pm 1\%$ .

Post-traitement : Tamisage (taille des pores  $< 10 \mu\text{m} \pm 0,1 \mu\text{m}$ ) pour éliminer les agglomérats ( $< 5\% \pm 1\%$ ) ; classification du flux d'air (GB/T 19077.1-2008) pour ajuster la distribution, avec un écart de  $< 2\% \pm 0,5\%$ .

#### **Méthode de détection :**

norme GB/T 19077.1-2008, le diffractomètre laser est utilisé pour mesurer D10, D50 et D90, avec un écart de  $< 5\% \pm 1\%$ , et D50 submicronique =  $0,3 \mu\text{m} \pm 0,01 \mu\text{m}$ .

Microscopie électronique à balayage (MEB) : Selon GB/T 16594-2008, observer la morphologie (polygonale, bord  $< 0,05 \mu\text{m} \pm 0,01 \mu\text{m}$ ) et l'agglomération ( $< 5\% \pm 1\%$ ).

Méthode de sédimentation : Selon GB/T 14634.2-2010, elle mesure la vitesse de sédimentation et convient aux particules grossières ( $> 5 \mu\text{m} \pm 0,01 \mu\text{m}$ ) .

Méthode de la surface spécifique : Selon la norme GB/T 19587-2017 (méthode BET), la taille moyenne des particules est calculée. La surface spécifique submicronique est  $> 3 \text{ m}^2/\text{g} \pm 0,2 \text{ m}^2/\text{g}$ .

Surveillance en ligne : L'analyseur de taille de particules laser en ligne contrôle la distribution en temps réel, avec un écart de  $< 3\% \pm 0,5\%$ .

### **(2) Contrôle de la pureté et test de la poudre de carbure de tungstène**

#### **Technologie de contrôle :**

Contrôle des matières premières : pureté de la poudre de tungstène  $> 99,9\% \pm 0,01\%$ , contenant O  $< 0,05\% \pm 0,01\%$  ; pureté du noir de carbone  $> 99,5\% \pm 0,01\%$ , contenant O  $< 0,03\% \pm 0,01\%$ .

Rapport de teneur en carbone : rapport molaire E:C  $1:1,01 \pm 0,01$ , carbone libre réduit à

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

0,08%±0,01%.

Contrôle de l'atmosphère : l'hydrogène ( $H_2$ ,  $O_2 < 10 \text{ ppm} \pm 1 \text{ ppm}$ ) réduit  $WO_3$  (taux de réduction  $> 99 \% \pm 1 \%$ ), l'oxyde  $< 0,03 \% \pm 0,01 \%$  ; l'atmosphère sous vide ( $< 10^{-2} \text{ Pa} \pm 10^{-3} \text{ Pa}$ ) supprime la volatilisation du carbone.

Post-traitement : tamisage (taille des pores  $< 10 \mu\text{m} \pm 0,1 \mu\text{m}$ ) pour éliminer les agglomérats et augmenter la pureté de  $0,5 \% \pm 0,1 \%$  ; lavage acide (HCl, pH  $2 \pm 0,1$ ) pour éliminer le Fe ( $< 0,01 \% \pm 0,002 \%$ ).

Optimisation de l'équipement : le four en graphite de haute pureté (contenant C  $< 0,01 \% \pm 0,002 \%$ ) réduit la pollution au carbone et le four rotatif améliore l'uniformité de la réaction.

#### **Méthode de détection :**

Détection de carbone libre : basée sur GB/T 5124-2017, méthode d'absorption infrarouge par combustion à haute température, précision  $\pm 0,005 \%$ .

Détection d'oxyde : Selon la norme GB/T 5124-2017,  $WO_3$  est déterminé par titrage par dissolution acide avec une précision de  $\pm 0,002 \%$ .

Détection d'impuretés métalliques : ICP-MS (GB/T 13748.20-2009), détection de Fe et Cr, limite de détection  $< 0,001 \%$ .

Analyse de la pureté de phase : la diffraction des rayons X (DRX, GB/T 27708-2011) a confirmé que la pureté de la phase WC était  $> 99,8 \% \pm 0,02 \%$ .

Surveillance en ligne : l'analyseur de gaz infrarouge surveille le  $CO_2$  en temps réel et contrôle le carbone libre  $< 0,1 \% \pm 0,01 \%$ .

### **(3) Contrôle de qualité et test de la teneur en carbone de la poudre de carbure de tungstène**

#### **Technologie de contrôle :**

Contrôle des matières premières : taille des particules de noir de carbone  $< 0,1 \mu\text{m} \pm 0,01 \mu\text{m}$ , pureté  $> 99,5 \% \pm 0,01 \%$ , garantissant l'uniformité du carbone.

Rapport de teneur en carbone : rapport molaire E:C  $1:1,01 \pm 0,01$ , carbone lié  $6,1 \% \pm 0,01 \%$ , carbone libre  $< 0,1 \% \pm 0,01 \%$ .

Conditions de réaction :  $1450-1600^\circ\text{C} \pm 10^\circ\text{C}$ , maintenir au chaud pendant 2 à 4 heures  $\pm 0,1$  heure, réaction complète ; atmosphère d'hydrogène ou de vide pour réduire la volatilisation du carbone (perte  $< 0,1 \% \pm 0,01 \%$ ).

Post-traitement : traitement thermique ( $800^\circ\text{C} \pm 10^\circ\text{C}$ , atmosphère  $H_2$ ) pour éliminer le carbone libre (réduction de  $0,05 \% \pm 0,01 \%$ ) ; décapage pour éliminer les impuretés carbonisées.

Optimisation des équipements : Le four rotatif (vitesse  $5 \text{ tr/min} \pm 0,5 \text{ tr/min}$ ) améliore l'uniformité de la distribution du carbone, avec un écart de  $< 2 \% \pm 0,5 \%$ .

#### **Méthode de détection :**

totale en carbone : basée sur GB/T 5124-2017, méthode d'absorption infrarouge par combustion à haute température, précision  $\pm 0,005 \%$ .

Carbone combiné : dissolution acide et séparation après combustion à haute température, précision  $\pm 0,002 \%$ .

Carbone libre : calcul de différence ou méthode de combustion directe, précision  $\pm 0,005 \%$ .

Analyse de phase : XRD (GB/T 27708-2011) confirme la phase WC et détecte la phase  $W_2C$  ou graphite.

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

Surveillance en ligne : l'analyseur de gaz infrarouge surveille le CO<sub>2</sub> en temps réel et contrôle la teneur en carbone à 6,0 %-6,2 % ± 0,01 %.

#### **(4) Influence globale de la qualité de la poudre de carbure de tungstène et de son application**

Optimisation des performances : la taille des particules de 0,1 à 0,5 µm ± 0,01 µm améliore la dureté (HV > 3000 ± 50), celle de 5 à 10 µm ± 0,01 µm améliore la ténacité (K<sub>1c</sub> > 20 MPa·m<sup>1/2</sup> ± 0,5) ; la pureté (carbone libre < 0,1 % ± 0,01 %, oxyde < 0,05 % ± 0,01 %) assure la densité (> 99 % ± 0,1 %) ; la teneur en carbone de 6,0 % à 6,2 % ± 0,01 % optimise la dureté et la résistance à l'usure. Efficacité du procédé : Le four rotatif, les additifs (VC, Cr<sub>3</sub>C<sub>2</sub>) et le contrôle de l'atmosphère (O<sub>2</sub> < 10 ppm ± 1 ppm) améliorent la cohérence de la qualité des outils aérospatiaux (durée de vie > 15 heures ± 1 heure) et des forets miniers (> 1000 m ± 100 m).

Fiabilité de la détection : l'analyse granulométrique au laser, l'analyse chimique et la DRX sont combinées pour fournir des données précises et optimiser les processus de production.

#### **(5) Défis et améliorations du contrôle qualité et des tests de la poudre de carbure de tungstène**

Défis : Une large distribution granulométrique (> 10 % ± 2 %) entraîne des fluctuations de performance ; l'introduction d'impuretés de pureté (telles que Fe > 0,02 % ± 0,005 %) affecte la résistance à la corrosion ; un écart de teneur en carbone (> 0,1 % ± 0,01 %) entraîne une impureté de phase.

Amélioration : l'IA a été introduite pour contrôler les paramètres du processus (température, atmosphère), l'écart de taille des particules était < 2 % ± 0,5 %, la pureté a été augmentée de 0,5 % ± 0,1 % et la teneur en carbone a été stabilisée à 6,1 % ± 0,01 %.

La granulométrie (0,1-10 µm ± 0,01 µm), la pureté (carbone libre < 0,1 % ± 0,01 %, oxyde < 0,05 % ± 0,01 %) et la teneur en carbone (6,0 %-6,2 % ± 0,01 %) de la poudre de carbure de tungstène sont gérées par le contrôle des matières premières, l'optimisation des réactions, l'ajout d'additifs et l'amélioration des équipements. Les méthodes de détection (granulométrie laser, analyse chimique, DRX) garantissent des paramètres précis, optimisent les performances du carbure cémenté et prennent en charge des applications haut de gamme telles que les outils aéronautiques, les moules résistants à l'usure et les foreuses minières.

## **4.2 Phase liante et additifs du carbure cémenté**

La phase liante (Co, Ni, 5%30%±1%) assure la ténacité (K<sub>1c</sub> 820 MPa·m<sup>1/2</sup> ± 0,5) et la résistance aux chocs (énergie d'impact > 10J±1J), et l'inhibiteur de grains (VC, Cr<sub>3</sub>C<sub>2</sub>, < 1%±0,01%) contrôle la croissance des grains WC (< 0,01µm/min±0,001µm/min) et améliore la dureté (HV>2000±30). Français La sélection de la phase liante et des additifs affecte les performances : le Co de haute pureté (> 99,9 % ± 0,01 %) améliore la ténacité, le Ni (> 99,8 % ± 0,01 %) améliore la résistance à la corrosion (taux de corrosion < 0,01 mm/an ± 0,002 mm/an) et le VC/ Cr<sub>3</sub>C<sub>2</sub> optimise la structure des grains fins (taille des grains WC < 0,5 µm ± 0,01 µm). Cette section analyse les caractéristiques de la poudre Co/Ni et le mécanisme d'inhibition des grains.

### **4.2.1 Caractéristiques et sélection des liants carbures cémentés - Poudres de Co et Ni**

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

La phase liante est un composant important du carbure cémenté. Elle assure la liaison entre les particules de WC et lui confère des propriétés clés telles que la ténacité, les performances d'usinage et la résistance à la corrosion. Le cobalt (Co) et le nickel (Ni) sont les liants les plus couramment utilisés pour le carbure cémenté, et leurs caractéristiques et leur sélection influencent directement les performances du carbure cémenté.

### (1) Propriétés et exigences des matériaux

La phase liante joue un rôle de « pont » dans le carbure cémenté, comblant les espaces entre les particules de WC, améliorant ainsi la ténacité et les propriétés de mise en œuvre du matériau, tout en influençant la résistance à la corrosion et la stabilité à haute température. Le cobalt et le nickel sont les liants privilégiés en raison de leurs excellentes propriétés physiques et chimiques.

#### Caractéristiques de la poudre de Co :

Structure cristalline : structure cubique à faces centrées (FCC), paramètre de réseau  $a = 0,3544 \text{ nm} \pm 0,0001 \text{ nm}$ , avec une symétrie élevée, système de glissement  $> 12$ , offrant une excellente capacité de déformation plastique.

Densité :  $8,90 \text{ g/cm}^3 \pm 0,05 \text{ g/cm}^3$ , proche de WC ( $15,63 \text{ g/cm}^3 \pm 0,05 \text{ g/cm}^3$ ), réduisant la contrainte de frittage.

Point de fusion :  $1495^\circ\text{C} \pm 5^\circ\text{C}$ , adapté au frittage à haute température ( $>1200^\circ\text{C} \pm 10^\circ\text{C}$ ).

Dureté : dureté Vickers HV  $100 \pm 10$ , inférieure à celle du WC, offrant un tampon de ténacité.

Ténacité : Ténacité à la rupture  $K_{1c} 15-20 \text{ MPa} \cdot \text{m}^{1/2} \pm 0,5$ , meilleure que Ni ( $K_{1c} 12-15 \text{ MPa} \cdot \text{m}^{1/2} \pm 0,5$ ).

Conductivité thermique :  $80 \text{ W/(m} \cdot \text{K)} \pm 5 \text{ W/(m} \cdot \text{K)}$ , aide à dissiper la chaleur et à prolonger la durée de vie de l'outil.

Coefficient de dilatation thermique :  $5,0 \times 10^{-6} \text{ K}^{-1} \pm 0,2 \times 10^{-6} \text{ K}^{-1}$ , correspondant au WC ( $5,2 \times 10^{-6} \text{ K}^{-1} \pm 0,2 \times 10^{-6} \text{ K}^{-1}$ ), réduisant la contrainte thermique ( $<50 \text{ MPa} \pm 10 \text{ MPa}$ ).

Exigences : pureté  $> 99,9\% \pm 0,01\%$ , Fe  $< 0,01\% \pm 0,002\%$ , O  $< 0,05\% \pm 0,01\%$ , granulométrie  $0,5-3 \mu\text{m} \pm 0,01 \mu\text{m}$ .

Influence sur les performances : La résistance à la flexion du carbure cémenté contenant  $10\% \pm 1\%$  de Co est  $> 4000 \text{ MPa} \pm 100 \text{ MPa}$  et la ténacité à la rupture  $K_{1c} > 18 \text{ MPa} \cdot \text{m}^{1/2} \pm 0,5$ , ce qui convient aux outils de coupe et aux équipements miniers.

#### Caractéristiques de la poudre de Ni :

Structure cristalline : structure cubique à faces centrées (FCC), paramètre de réseau  $a = 0,3524 \text{ nm} \pm 0,0001 \text{ nm}$ , système de glissement  $> 12$ , la capacité de déformation plastique est légèrement inférieure à celle du Co.

Densité :  $8,91 \text{ g/cm}^3 \pm 0,05 \text{ g/cm}^3$ , bien adaptée au WC.

Point de fusion :  $1455^\circ\text{C} \pm 5^\circ\text{C}$ , adapté au frittage à haute température.

Dureté : dureté Vickers HV  $90 \pm 10$ , plus douce que le Co, ténacité légèrement inférieure.

Résistance à la corrosion : Le potentiel de corrosion est de  $0,2 \text{ V} \pm 0,02 \text{ V}$  (par rapport au SCE), ce qui est supérieur à celui du Co ( $0,1 \text{ V} \pm 0,02 \text{ V}$ ). Le taux de corrosion dans un environnement à pH 2-12 est inférieur à  $0,02 \text{ mm/an} \pm 0,005 \text{ mm/an}$ .

#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

Conductivité thermique :  $90 \text{ W}/(\text{m} \cdot \text{K}) \pm 5 \text{ W}/(\text{m} \cdot \text{K})$ , supérieure à celle du Co, ce qui aide à dissiper la chaleur.

Coefficient de dilatation thermique :  $6,0 \times 10^{-6} \text{ K}^{-1} \pm 0,2 \times 10^{-6} \text{ K}^{-1}$ , légèrement différent du WC, et la contrainte après frittage est légèrement plus élevée ( $< 70 \text{ MPa} \pm 10 \text{ MPa}$ ).

Exigences : pureté  $> 99,8 \% \pm 0,01 \%$ , Fe  $< 0,02 \% \pm 0,002 \%$ , O  $< 0,1 \% \pm 0,01 \%$ , granulométrie  $0,5-5 \mu\text{m} \pm 0,01 \mu\text{m}$ .

Impact sur les performances : Le taux de corrosion du carbure cémenté contenant  $12 \% \pm 1 \%$  de Ni dans un environnement marin (pH 8, profondeur 5 000 m, salinité 3,5 %) est de  $0,02 \text{ mm/an} \pm 0,005 \text{ mm/an}$ , ce qui convient aux scénarios résistants à la corrosion.

### Ratio et scénarios d'application :

Le cobalt représente plus de  $80 \% \pm 2 \%$  de la phase liante. Grâce à son excellente ténacité, il est adapté aux applications à fort impact (outils aéronautiques et forets miniers, par exemple).

Le nickel représente  $< 20 \% \pm 2 \%$ . Grâce à sa forte résistance à la corrosion, il est adapté aux environnements chimiques et marins (tels que les vannes en eaux profondes et les corps de pompes chimiques).

Exemples :

L'énergie d'impact de l'outil contenant  $10 \% \pm 1 \%$  de Co dans la coupe aéronautique ( $1000 \text{ }^\circ\text{C}$ , alliage Ti-6Al-4V) est  $> 12 \text{ J} \pm 1 \text{ J}$ , la quantité d'usure est  $< 0,15 \text{ mm} \pm 0,03 \text{ mm}$  et la durée de vie est  $> 12 \text{ h} \pm 1 \text{ h}$ .

Pour les vannes en eaux profondes (5 000 m, salinité 3,5 %) contenant  $12 \% \pm 1 \%$  de Ni, la profondeur de corrosion est  $< 3 \mu\text{m} \pm 0,5 \mu\text{m}$  et la durée de vie est  $> 5 \text{ ans} \pm 0,5 \text{ an}$ .

## (2) Critères de sélection et optimisation des poudres de Co et de Ni

La sélection des poudres de Co et de Ni doit prendre en compte de manière exhaustive la pureté, la taille des particules, la morphologie, le processus de production et la compatibilité avec le WC pour optimiser les performances du carbure cémenté.

### pureté:

Co :  $> 99,9 \% \pm 0,01 \%$ , Fe  $< 0,01 \% \pm 0,002 \%$ , O  $< 0,05 \% \pm 0,01 \%$ . Une faible teneur en Fe réduit la formation de phase  $\eta$  ( $\text{Co}_3\text{W}_3\text{C}$ ) ( $< 0,5 \% \pm 0,1 \%$ ), une faible teneur en O réduit la porosité ( $< 0,1 \% \pm 0,02 \%$ ) et augmente la résistance de  $3 \% \pm 0,5 \%$ .

Ni :  $> 99,8 \% \pm 0,01 \%$ , Fe  $< 0,02 \% \pm 0,002 \%$ , O  $< 0,1 \% \pm 0,01 \%$ . La faible teneur en impuretés améliore la résistance à la corrosion et réduit le taux de corrosion de  $2 \% \pm 0,5 \%$ .

Impact : La haute pureté réduit les défauts de frittage (tels que les pores et les inclusions) et augmente la résistance à la flexion à  $> 4 200 \text{ MPa} \pm 100 \text{ MPa}$ .

### Taille des particules :

Co :  $0,5-1 \mu\text{m} \pm 0,01 \mu\text{m}$ , améliore la dispersion (uniformité  $> 95 \% \pm 1 \%$ ) et la ténacité de  $5 \% \pm 1 \%$ ;  $> 3 \mu\text{m} \pm 0,01 \mu\text{m}$  conduit à une distribution inégale et la ténacité diminue de  $3 \% \pm 0,5 \%$ .

Ni :  $0,5-3 \mu\text{m} \pm 0,01 \mu\text{m}$ , correspond au WC ( $1 \mu\text{m} \pm 0,01 \mu\text{m}$ ), résistance de liaison d'interface  $> 50 \text{ MPa} \pm 5 \text{ MPa}$ , résistance à la corrosion augmentée de  $2 \% \pm 0,5 \%$ ;  $> 5 \mu\text{m} \pm 0,01 \mu\text{m}$  réduit

### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

l'uniformité et le taux de corrosion augmente de  $1\% \pm 0,2\%$ .

Impact : La taille fine des particules améliore l'uniformité de la distribution de la phase liante et la porosité après frittage est  $< 0,05\% \pm 0,01\%$ .

#### **Apparence:**

Co : sphérique (taux de sphéroïdisation  $> 90\% \pm 2\%$ ), agglomération réduite ( $< 5\% \pm 1\%$ ), fluidité améliorée de  $3\% \pm 0,5\%$  ( $< 25\text{ s}/50\text{ g} \pm 2\text{ s}$ , GB/T 1482-2010), adapté au moulage par compression.

Ni : polygonal (bord  $< 0,1\ \mu\text{m} \pm 0,01\ \mu\text{m}$ ) ou presque sphérique, améliore la résistance de liaison de l'interface ( $> 50\text{ MPa} \pm 5\text{ MPa}$ ) et améliore la résistance à l'usure.

Impact : La morphologie optimisée améliore l'uniformité de l'étalement de la poudre et la résistance de la liaison par frittage, et la rugosité de surface du carbure cémenté est  $Ra < 5\ \mu\text{m} \pm 1\ \mu\text{m}$ .

#### **Stabilité chimique :**

Co : Le taux d'oxydation dans l'air à  $< 600\text{ }^\circ\text{C} \pm 10\text{ }^\circ\text{C}$  est  $< 0,01\text{ mg}/\text{cm}^2 \cdot \text{h} \pm 0,002\text{ mg}/\text{cm}^2 \cdot \text{h}$ . L'atmosphère de frittage doit être contrôlée ( $\text{O}_2 < 10\text{ ppm} \pm 1\text{ ppm}$ ).

Ni : Le taux de corrosion dans un environnement de pH 2-12 est  $< 0,02\text{ mm}/\text{an} \pm 0,005\text{ mm}/\text{an}$ , et sa résistance aux acides et aux alcalis est meilleure que celle du Co.

Impact : La haute résistance à la corrosion du Ni convient aux environnements acides (tels que les corps de pompes chimiques, pH 2-12), et le Co doit être protégé de l'oxydation à haute température.

#### **Processus de production :**

Co:

Méthode électrolytique :  $\text{O} < 0,03\% \pm 0,005\%$ ,  $\text{Fe} < 0,005\% \pm 0,001\%$ , pureté augmentée de  $1\% \pm 0,2\%$ , adaptée aux applications à haute ténacité.

Méthode carbonyle :  $\text{O} > 0,1\% \pm 0,01\%$ ,  $\text{Fe} < 0,01\% \pm 0,002\%$ , faible coût mais pureté légèrement inférieure.

de réduction : taille des particules  $0,5\text{-}3\ \mu\text{m} \pm 0,01\ \mu\text{m}$ , adaptée à la production de masse.

Ni:

Méthode d'atomisation :  $\text{Fe} < 0,01\% \pm 0,002\%$ ,  $\text{O} < 0,05\% \pm 0,01\%$ , particules sphériques ( $> 90\% \pm 2\%$ ), adaptées aux exigences de pureté élevée.

Méthode d'électrolyse : taille des particules  $1\text{-}5\ \mu\text{m} \pm 0,01\ \mu\text{m}$ ,  $\text{O} < 0,1\% \pm 0,01\%$ , faible coût.

Méthode du carbonyle : La morphologie est uniforme, mais la teneur en Fe est légèrement plus élevée ( $< 0,02\% \pm 0,002\%$ ).

Impact : Le Co électrolytique et le Ni atomisé améliorent la pureté et la cohérence de la morphologie, et le carbure cémenté a de meilleures performances.

#### **Compatibilité avec WC :**

Co : L'angle de mouillage avec WC est  $< 10^\circ \pm 1^\circ$  et la force de liaison est  $> 60\text{ MPa} \pm 5\text{ MPa}$ , ce qui convient aux scénarios à haute ténacité.

Ni : angle de mouillage  $< 15^\circ \pm 1^\circ$ , force de liaison  $> 50\text{ MPa} \pm 5\text{ MPa}$ , la résistance à la corrosion est meilleure que Co.

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

Impact : Une bonne mouillabilité garantit que l'interface est sans défaut après frittage et la résistance à la flexion est  $> 4000 \text{ MPa} \pm 100 \text{ MPa}$ .

Exemples :

$K_{1c} 18 \text{ MPa} \cdot \text{m}^{1/2} \pm 0,5$  ) préparé par électrolyse de  $0,8 \mu\text{m} \pm 0,01 \mu\text{m}$  Co (O  $< 0,03\% \pm 0,005\%$  ) est utilisé pour les forets miniers (impact  $> 200 \text{ MPa} \pm 10 \text{ MPa}$ ) avec une durée de vie de  $> 1200 \text{ m} \pm 100 \text{ m}$ .

$2 \mu\text{m} \pm 0,01 \mu\text{m}$  de Ni atomisé (Fe  $< 0,01\% \pm 0,002\%$ ) (taux de corrosion  $0,01 \text{ mm/an} \pm 0,002 \text{ mm/an}$ ) sont utilisés dans les usines chimiques (pH 4) avec une durée de vie de  $> 3 \text{ ans} \pm 0,3 \text{ an}$ .

### (3) Stratégie d'optimisation pour les poudres de Co et de Ni

#### Processus de mélange :

Phase de liaison composite Co+Ni : rapport Co:Ni  $4:1 \pm 0,2$ , combinant la ténacité élevée du Co et la résistance à la corrosion du Ni, adaptée aux équipements miniers marins (résistance aux chocs  $> 10 \text{ J} \pm 1 \text{ J}$ , taux de corrosion  $< 0,015 \text{ mm/an} \pm 0,002 \text{ mm/an}$ ).

Procédé de broyage à billes : vitesse de rotation  $300 \text{ tr/min} \pm 10 \text{ tr/min}$ , rapport bille/matériau  $10:1 \pm 0,1$ , temps  $10\text{-}20 \text{ heures} \pm 1 \text{ heure}$ , assurer une dispersion uniforme (uniformité  $> 95\% \pm 1\%$ ).

Additifs :  $0,1\% \text{-} 0,5\% \pm 0,01\%$  VC ou  $\text{Cr}_3 \text{ C}_2$  inhibe la croissance des grains et l'écart de taille des particules est  $< 3\% \pm 0,5\%$ .

#### Procédé de frittage :

Frittage sous vide :  $1350^\circ\text{C} \pm 10^\circ\text{C}$ , atmosphère  $< 10^{-2} \text{ Pa} \pm 10^{-3} \text{ Pa}$ , oxydation réduite (O  $< 0,02\% \pm 0,005\%$ ).

HIP (pressage isostatique à chaud) :  $1400^\circ\text{C} \pm 10^\circ\text{C}$ , pression  $100 \text{ MPa} \pm 5 \text{ MPa}$ , densité  $> 99,5\% \pm 0,1\%$ , augmentation de la résistance  $5\% \pm 1\%$ .

Contrôle de l'atmosphère : l'atmosphère  $\text{H}_2$  ( $\text{O}_2 < 10 \text{ ppm} \pm 1 \text{ ppm}$ ) inhibe l'oxydation du Co et l'atmosphère Ar protège la stabilité du Ni.

#### Traitement de surface :

Poudre de Co : passivation de surface (adsorption d' $\text{O}_2 < 0,01 \text{ mg/g} \pm 0,002 \text{ mg/g}$ ), réduisant l'oxydation de stockage.

Poudre de Ni : Revêtement antioxydant (tel que couche mince de  $\text{SiO}_2$ , épaisseur  $< 0,1 \mu\text{m} \pm 0,01 \mu\text{m}$ ), améliorant la résistance à la corrosion de  $1\% \pm 0,2\%$ .

### (4) Application d'ingénierie

#### Carbure cémenté à base de co-carbone :

Outils d'aviation

Contient  $10\% \pm 1\%$  de Co, dureté  $\text{HV } 2900 \pm 50$ ,  $K_{1c} 18 \text{ MPa} \cdot \text{m}^{1/2} \pm 0,5$ , coupe Ti-6Al-4V ( $1000^\circ\text{C}$ , vitesse  $> 300 \text{ m/min} \pm 10 \text{ m/min}$ ), quantité d'usure  $< 0,15 \text{ mm} \pm 0,03 \text{ mm}$ , durée de vie  $> 12 \text{ heures} \pm 1 \text{ heure}$ .

Trépan de forage minier

#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

Contient 8%±1% Co, résistance aux chocs > 10 J±1 J, forage de roche dure (résistance à la compression > 200 MPa±10 MPa) durée de vie > 1200 m±100 m.

Moule résistant à l'usure

Contient 12 % ± 1 % de Co, matrice de frappe à froid (> 10<sup>6</sup> fois ± 10<sup>5</sup> fois), déformation < 0,01 mm ± 0,002 mm.

#### **Carbure cémenté à base de Ni :**

Vanne de haute mer

Contient 12 % ± 1 % de Ni, profondeur de corrosion < 5 μm ± 1 μm, durée de vie en milieu marin profond (5 000 m, salinité 3,5 %) > 5 ans ± 0,5 an.

Corps de pompe chimique

Contient 15 % ± 1 % de Ni, pH 2-12, taux de corrosion 0,01 mm/an ± 0,002 mm/an, durée de vie > 2 ans ± 0,2 an.

Équipement minier marin

Contient 10 % ± 1 % Ni + 5 % ± 1 % Co, résistance aux chocs > 8 J ± 1 J, résistance à la corrosion améliorée de 3 % ± 0,5 %, durée de vie > 3 ans ± 0,3 an.

#### **Phase de liaison composite Co+Ni :**

Outils de forage pétrolier : rapport Co:Ni 3:1±0,2, K<sub>1c</sub> 16 MPa·m<sup>1/2</sup> ± 0,5, taux de corrosion < 0,015 mm/an ± 0,002 mm/an, durée de vie > 1000 heures ± 100 heures.

### **(5) Tendances de développement**

Phase liante à l'échelle nanométrique : Développement de poudre Co/Ni <0,5 μm±0,01 μm, dispersibilité améliorée (uniformité>98%±1%), dureté du carbure>HV 3000±50, ténacité> K<sub>1c</sub> 20 MPa·m<sup>1/2</sup> ± 0,5.

Production verte : Utiliser l'électrolyse des énergies renouvelables pour produire de la poudre Co/Ni, réduisant ainsi la consommation d'énergie de 15 % ± 2 % et réduisant les émissions (CO<sub>2</sub> < 500 kg/t ± 50 kg/t).

Contrôle intelligent : l'IA est introduite pour optimiser le rapport Co/Ni et les paramètres de frittage, améliorant la cohérence des performances de 5 % ± 1 % et l'efficacité de la production de 10 % ± 2 %.

Français Le Co et le Ni sont utilisés comme liants de carbure cémenté. Le Co (FCC, a=0,3544 nm±0,0001 nm, point de fusion 1495°C±5°C) se caractérise principalement par une ténacité élevée ( K<sub>1c</sub> 15-20 MPa·m<sup>1/2</sup> ± 0,5 ), représentant >80%±2%, et convient aux outils d'aviation et aux foreuses minières ; le Ni (FCC, a=0,3524 nm±0,0001 nm, point de fusion 1455°C±5°C) se caractérise par une résistance à la corrosion (taux de corrosion <0,02 mm/an±0,005 mm/an), représentant <20%±2%, et convient aux environnements marins et chimiques. Français Les critères de sélection se concentrent sur la pureté (Co > 99,9 % ± 0,01 %, Ni > 99,8 % ± 0,01 %), la taille des particules (Co 0,5-1 μm ± 0,01 μm, Ni 0,5-3 μm ± 0,01 μm) et la morphologie (Co sphérique, Ni polygonal). En optimisant le processus de production (Co électrolytique, Ni atomisé), le processus de mélange et la technologie de frittage, les performances du carbure cémenté sont considérablement améliorées pour répondre aux besoins d'une ingénierie diversifiée. À l'avenir, les nano-, vertes et intelligentes seront les orientations de développement de la poudre Co/Ni.

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

#### 4.2.2 Mécanisme des inhibiteurs de grains (carbure de vanadium (VC) et carbure de chrome (Cr<sub>3</sub>C<sub>2</sub>))

Croissance des grains de carbure de tungstène (WC) dans la préparation du carbure cimenté. Le carbure de vanadium (VC) et le carbure de chrome (Cr<sub>3</sub>C<sub>2</sub>) sont les deux carbures les plus couramment utilisés. L'ajout de VC et de Cr<sub>3</sub>C<sub>2</sub> permet d'affiner efficacement les grains, d'améliorer la dureté et la résistance, et d'optimiser les performances du carbure cimenté. Voici une analyse détaillée des caractéristiques de base, du mécanisme d'inhibition, des facteurs d'influence, de la stratégie d'optimisation et des applications techniques.

##### (1) Caractéristiques de base

###### VC (carbure de vanadium) :

Formule chimique : VC, système cristallin cubique (FCC), paramètre de réseau  $a = 0,416 \text{ nm} \pm 0,001 \text{ nm}$ .

Densité :  $5,77 \text{ g/cm}^3 \pm 0,05 \text{ g/cm}^3$ , point de fusion  $2830^\circ\text{C} \pm 10^\circ\text{C}$ , dureté HV  $2800 \pm 50$ .

Caractéristiques : dureté élevée, forte stabilité thermique, faible solubilité dans la phase liante Co ( $\sim 5\% \pm 0,5\%$ ), adaptée au carbure cimenté submicronique.

###### Cr<sub>3</sub>C<sub>2</sub> (carbure de chrome) :

Formule chimique : Cr<sub>3</sub>C<sub>2</sub>, système cristallin orthorhombique, paramètres de réseau  $a = 0,552 \text{ nm} \pm 0,001 \text{ nm}$ ,  $b = 1,149 \text{ nm} \pm 0,001 \text{ nm}$ ,  $c = 0,283 \text{ nm} \pm 0,001 \text{ nm}$ .

Densité :  $6,68 \text{ g/cm}^3 \pm 0,05 \text{ g/cm}^3$ , point de fusion  $1895^\circ\text{C} \pm 10^\circ\text{C}$ , dureté HV  $1300 \pm 50$ .

Caractéristiques : Bonne résistance à la corrosion, stabilité thermique élevée, certaine solubilité avec la phase de liaison Co/Ni (solubilité dans Co  $\sim 2\% \pm 0,2\%$ ), adaptée au carbure cimenté de taille micronique.

##### (2) Mécanisme et effet d'inhibition

Les inhibiteurs de grains peuvent améliorer considérablement la dureté ( $\text{HV} > 2000 \pm 30$ ) et la résistance ( $> 4000 \text{ MPa} \pm 100 \text{ MPa}$ ) du carbure cimenté en régulant le comportement de croissance des grains de WC pendant le frittage (taux de croissance  $< 0,01 \mu\text{m}/\text{min} \pm 0,001 \mu\text{m}/\text{min}$ ).

###### Mécanisme inhibiteur du VC :

Au cours du processus de frittage, le VC se dissout partiellement dans la phase Co (solubilité  $\sim 5\% \pm 0,5\%$ ), réduit l'énergie de l'interface WC/Co ( $< 0,5 \text{ J/m}^2 \pm 0,1 \text{ J/m}^2$ ) et inhibe le processus de dissolution-reprécipitation du WC (maturation d'Ostwald, vitesse  $< 10^{-9} \text{ m/s} \pm 10^{-10} \text{ m/s}$ ).

Le VC précipite aux joints des grains de WC pour former des particules nanométriques ( $< 0,1 \mu\text{m} \pm 0,01 \mu\text{m}$ ), qui entravent la migration et la fusion des grains de WC.

Effet : L'ajout de  $0,5\% \pm 0,01\%$  de VC peut réduire la taille moyenne des grains de WC de  $1 \mu\text{m} \pm 0,01 \mu\text{m}$  à  $0,3 \mu\text{m} \pm 0,01 \mu\text{m}$ , augmenter la dureté de  $10\% \pm 2\%$  ( $\text{HV} > 2200 \pm 30$ ) et améliorer la résistance à l'usure (perte par usure  $< 0,08 \text{ mm} \pm 0,02 \text{ mm}$ ).

#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

### **Le mécanisme d'inhibition du Cr<sub>3</sub>C<sub>2</sub> :**

Cr<sub>3</sub>C<sub>2</sub> précipite une fine couche (épaisseur <5 nm±1 nm) à l'interface WC/Co, empêchant la diffusion des atomes C et W (coefficient de diffusion <10<sup>-11</sup> cm<sup>2</sup>/s±10<sup>-12</sup> cm<sup>2</sup>/s) et réduisant la fusion des grains (taux de fusion <5%±1%).

Le Cr<sub>3</sub>C<sub>2</sub> se dissout partiellement dans la phase Co, modifiant l'énergie interfaciale du frittage en phase liquide (réduite à <1 J/m<sup>2</sup> ± 0,1 J/m<sup>2</sup>) et ralentissant le taux de dissolution-reprécipitation du WC.

### **Effet:**

L'ajout de 0,5 % ± 0,01 % de Cr<sub>3</sub>C<sub>2</sub> peut maintenir la taille des grains de WC à 0,5 μm ± 0,01 μm, augmenter la résistance de 5 % ± 1 % (résistance à la flexion > 4 200 MPa ± 100 MPa) et améliorer la résistance à la corrosion (taux de corrosion < 0,015 mm/an ± 0,002 mm/an).

### **Champ d'application :**

Le VC est plus adapté au carbure cémenté submicronique (grains WC < 0,5 μm ± 0,01 μm) en raison de son fort effet inhibiteur.

Le Cr<sub>3</sub>C<sub>2</sub> est plus adapté au carbure cémenté de taille micronique (grains WC 1-3 μm±0,01 μm) car il combine résistance et résistance à la corrosion.

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

#### **Les grains raffinés améliorent la dureté et la résistance à l'usure**

La dureté du carbure cémenté contenant 0,5 % ± 0,01 % de VC est HV > 3100 ± 50, ce qui convient au traitement de l'aviation.

#### **Le renforcement des joints de grains améliore la résistance et la ténacité**

La résistance à la flexion du carbure cémenté contenant 0,5 % ± 0,01 % de Cr<sub>3</sub>C<sub>2</sub> est > 4 200 MPa ± 100 MPa et la ténacité à la rupture K<sub>1c</sub> > 18 MPa·m<sup>1/2</sup> ± 0,5.

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

Le VC améliore la stabilité des joints de grains et la déformation du carbure cémenté à 1000°C±10°C est <0,01 mm±0,002 mm.

### **(3) Facteurs d'influence et optimisation**

L'effet des inhibiteurs de grains est affecté par de nombreux facteurs, tels que la quantité d'ajout, la taille des particules, la température de frittage et l'atmosphère, et les meilleures performances doivent être garanties en optimisant le processus.

### **Montant de l'ajout :**

VC : 0,1 %-0,5 % ± 0,01 %. Une quantité excessive (> 0,8 % ± 0,01 %) générera une phase fragile V<sub>6</sub>C<sub>5</sub> (dureté HV < 1 500 ± 50), entraînant une diminution de la ténacité de 10 % ± 2 % (K<sub>1c</sub> < 15 MPa·m<sup>1/2</sup> ± 0,5).

Cr<sub>3</sub>C<sub>2</sub> : 0,5%-1%±0,01%. Une quantité excessive (>1,5%±0,01%) réduit la fluidité de la phase Co (<10 s/50 g±0,5 s) et la densité diminue de 1%±0,2% (<99%±0,1%).

Optimisation : Contrôlez avec précision la quantité d'ajout, VC recommande 0,3 % ± 0,01 %, Cr<sub>3</sub>

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

C<sub>2</sub> recommande 0,5 % ± 0,01 % pour équilibrer la dureté et la ténacité.

#### Taille des particules :

VC : <0,1 μm±0,01 μm améliore la dispersion (écart <5%±1%) et la dureté augmente de 5%±1% (HV >2300±30).

Cr<sub>3</sub>C<sub>2</sub> : <0,5 μm±0,01 μm améliore la résistance de liaison de l'interface (>50 MPa±5 MPa) et augmente la résistance de 3%±0,5% (>4300 MPa±100 MPa).

Optimisation : Utiliser du VC et du Cr<sub>3</sub>C<sub>2</sub> à l'échelle nanométrique , combinés à une dispersion ultrasonore (fréquence 40 kHz±1 kHz) pour réduire l'agglomération (<5%±1%).

#### Température de frittage :

1450°C±10°C assure la dissolution du VC et du Cr<sub>3</sub>C<sub>2</sub> (taux de dissolution>90%±2%), et l'effet d'inhibition est amélioré de 5%±1%.

1550°C±10°C induit la précipitation de VC et Cr<sub>3</sub>C<sub>2</sub> (taux de précipitation>10%±2%), et la dureté diminue de 3%±0,5% (HV <2000±30).

Optimisation : Contrôler la température de frittage à 1400-1450°C ± 10°C et prolonger le temps de maintien (2-3 heures ± 0,1 heure) pour assurer une inhibition uniforme.

#### Une atmosphère :

L'atmosphère H<sub>2</sub> (O<sub>2</sub> < 10 ppm±1 ppm) inhibe l'oxydation du VC et du Cr<sub>3</sub> C<sub>2</sub> ( O<sub>2</sub> < 0,05 %±0,01 %), et la pureté est augmentée de 1 %±0,2 %.

L'atmosphère sous vide (<10<sup>-2</sup> Pa±10<sup>-3</sup> Pa) réduit la volatilisation du VC (perte <0,1%±0,01%) et améliore l'effet d'inhibition de 2%±0,5%.

L'atmosphère H<sub>2</sub> est préférée, combinée à un prétraitement sous vide pour réduire la teneur en oxyde.

#### Méthode de mélange :

Broyeur à boulets (vitesse 300 tr/min ± 10 tr/min, temps 10-20 h ± 1 h) pour assurer une dispersion uniforme (uniformité > 95% ± 1%).

Optimisation : Ajouter des dispersants (tels que l'éthanol, 0,1 % ± 0,01 %) pour réduire l'agglomération (< 3 % ± 1 %) et améliorer l'efficacité de la dispersion.

#### Exemples :

0,3%±0,01% VC (taille des particules <0,1 μm±0,01 μ m ) , 1450°C±10°C, procédé sous atmosphère H<sub>2</sub> pour générer des grains WC 0,2 μm±0,01 μ m , dureté HV 2300±30, utilisé pour les forets PCB (durée de vie >10<sup>5</sup> trous±10<sup>4</sup> trous).

0,5 % ± 0,01 % Cr<sub>3</sub> C<sub>2</sub> (taille des particules < 0,5 μm ± 0,01 μ m ) , 1 400 °C ± 10 °C, procédé sous atmosphère sous vide pour générer des grains de WC 0,5 μm ± 0,01 μ m , résistance > 4 300 MPa ± 100 MPa, utilisé pour les forets miniers (durée de vie > 1 200 m ± 100 m).

#### (4) Application d'ingénierie

##### VC a ajouté :

#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

0,5%±0,01% VC est utilisé pour les outils super durs (grain WC <0,5 µm±0,01 µ m ) dans l'usinage aéronautique (1000°C, alliage Ti-6Al-4V), avec une usure <0,08 mm±0,02 mm et une durée de vie >15 h±1 h.

0,3%±0,01% VC pour forets PCB (grain WC 0,2 µm±0,01 µ m ) , dureté HV 2300±30, durée de vie>10<sup>5</sup> trous±10<sup>4</sup> trous.

#### **Addition de Cr<sub>3</sub>C<sub>2</sub> :**

0,5 % ± 0,01 % de Cr<sub>3</sub> C<sub>2</sub> est utilisé dans les forets miniers (grain WC 1-3 µm± 0,01 µ m ) , avec une durée de vie de > 1 200 m± 100 m dans le forage de roche dure (résistance à la compression > 200 MPa± 10 MPa).

0,8 % ± 0,01 % de Cr<sub>3</sub> C<sub>2</sub> est utilisé pour les corps de pompe chimique (grain WC 1 µm ± 0,01 µ m ) , le taux de corrosion dans un environnement pH 2-12 est < 0,015 mm/an ± 0,002 mm/an et la durée de vie est > 2 ans ± 0,2 an.

#### **VC+Cr<sub>3</sub>C<sub>2</sub> :**

0,3 % ± 0,01 % VC + 0,5 % ± 0,01 % Cr<sub>3</sub> C<sub>2</sub> est utilisé pour les équipements miniers marins (grain WC 0,5 µm±0,01 µ m ) , résistance aux chocs > 10 J± 1 J, taux de corrosion < 0,01 mm/an ± 0,002 mm/an, durée de vie > 3 ans ± 0,3 an.

### **(5) Tests et contrôle qualité**

#### **Taille des grains**

La microscopie électronique à balayage (MEB, GB/T 16594-2008) a été utilisée pour mesurer la taille des grains de WC (écart < 5 % ± 1 %).

Uniformité de la distribution : le spectre d'énergie des rayons X (EDS, GB/T 17359-2012) est utilisé pour détecter la distribution de VC/ Cr<sub>3</sub>C<sub>2</sub> aux joints de grains (écart < 3 % ± 0,5 %).

#### **Tests de performance**

Dureté : Selon la norme ISO 4499-2, mesurer la dureté Vickers (HV > 2000 ± 30).

Résistance : Selon GB/T 3851-2015, tester la résistance à la flexion (> 4000 MPa ± 100 MPa).

Résistance à l'usure : Conformément à la norme GB/T 12444-2006, mesurer la quantité d'usure (< 0,08 mm ± 0,02 mm).

Surveillance en ligne : l'imagerie thermique infrarouge surveille la température de frittage (écart < 5 °C ± 1 °C) pour garantir un effet d'inhibition constant.

Les inhibiteurs de grains VC et Cr<sub>3</sub>C<sub>2</sub> inhibent la croissance des grains WC (taux de croissance < 0,01 µm / min ± 0,001 µm / min) par le biais d'un mécanisme de dissolution-reprécipitation, affinent les grains (< 0,5 µm ± 0,01 µ m ) et améliorent significativement la dureté (HV > 2000 ± 30), la résistance (> 4000 MPa ± 100 MPa) et la résistance à l'usure (perte d'usure < 0,08 mm ± 0,02 mm) du carbure cémenté. Le VC convient au carbure cémenté submicronique (fort effet inhibiteur) et le Cr<sub>3</sub>C<sub>2</sub> convient au niveau micronique ( en tenant compte de la résistance à la corrosion). Français Le meilleur effet d'inhibition peut être obtenu en optimisant la quantité d'ajout (VC 0,1%-

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

0,5%±0,01%, Cr<sub>3</sub>C<sub>2</sub> 0,5%-1%±0,01%), la taille des particules (VC <0,1 μm±0,01 μm , Cr<sub>3</sub>C<sub>2</sub> <0,5 μm±0,01 μm ), la température de frittage (1450°C±10°C) et l'atmosphère (H<sub>2</sub> ou vide). L'application de VC et Cr<sub>3</sub>C<sub>2</sub> améliore considérablement les performances des outils aéronautiques (durée de vie>15 heures±1 heure), des forets miniers (durée de vie>1200 m±100 m) et des équipements chimiques (durée de vie>2 ans±0,2 an).

### 4.3 Prétraitement des poudres

Le prétraitement des poudres optimise l'uniformité du mélange (écart < 5 % ± 1 %), la distribution granulométrique (0,110 μm ± 0,01 μm) et la fluidité (1 316 s/50 g ± 0,5 s) du WC, du Co/Ni et des additifs par broyage à boulets (broyage humide/sec, rapport billes/poudre 10:1 ± 0,5) et séchage par atomisation (débit 100 L/h ± 10 L/h). Le prétraitement assure la densité de frittage (> 99 % ± 0,1 %) et la constance des performances (écart de dureté < ± 30 HV), réduit la porosité (< 0,1 % ± 0,02 %) et améliore la résistance (> 4 000 MPa ± 100 MPa). Cette section analyse les procédés de broyage à boulets et de séchage par atomisation.

#### 4.3.1 Procédé de broyage à boulets (broyage humide/broyage à sec, rapport boulets/matériau 10:1)

##### Paramètres et principe du procédé

Le broyage à boulets utilise des boulets WC (diamètre 510 mm ± 0,1 mm, dureté HV 1800 ± 50) pour broyer du WC (0,110 μm ± 0,01 μm), du Co/Ni (0,53 μm ± 0,01 μm) et des additifs (VC/Cr<sub>3</sub>C<sub>2</sub>, <0,5 μm ± 0,01 μm), avec un rapport bille/matériau de 10:1 ± 0,5, une vitesse de rotation de 200400 tr/min ± 10 tr/min et un temps de 424 h ± 0,1 h.

##### Broyage humide

Utiliser de l'éthanol (pureté > 99,5 % ± 0,01 %, quantité ajoutée 50 % 100 % ± 5 % fraction massique), ajouter un dispersant (PEG, 0,5 % 1 % ± 0,01 %), réduire l'agglomération (< 5 % ± 1 %), et l'écart de taille des particules est < 3 % ± 0,5 %.

##### Broyage à sec

Pas de milieu, adapté à la formule à faible teneur en Co (<6%±1%), pollution réduite (Fe<0,01%±0,002%), mais taux d'agglomération plus élevé (>10%±2%).

Le broyage humide a représenté > 90 % ± 2 % en raison d'une grande uniformité (écart de mélange < 2 % ± 0,5 %).

La cinétique était basée sur l'énergie de collision (10<sup>-3</sup> J/coup ± 10<sup>-4</sup> J/coup) et un taux de raffinement de 0,1 μm /h ± 0,01 μm /h.

Par exemple, le broyage humide (12 h ± 0,1 h, éthanol 100 % ± 5 %) produit une poudre mixte de WC 0,5 μm ± 0,01 μm et Co 0,8 μm ± 0,01 μm avec une uniformité de > 98 % ± 1 %, qui est utilisée pour les outils aéronautiques (dureté HV 2200 ± 30, durée de vie > 12 h ± 1 h).

#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

## Facteurs d'influence et optimisation

L'effet du broyage à boulets est affecté par les facteurs suivants :

### Rapport bille/matériau

10:1±0,5 a une efficacité de raffinage élevée ( $> 90 \% \pm 2 \%$ ),  $> 15:1$  augmente la contamination ( $Fe > 0,05 \% \pm 0,01 \%$ ) et la dureté diminue de  $2 \% \pm 0,5 \%$ .

### Vitesse

300 tr/min  $\pm 10$  tr/min équilibrent l'efficacité et l'usure (usure des billes  $< 0,1 \% \pm 0,02 \%$ ),  $< 200$  tr/min raffinement insuffisant (taille des particules  $> 1 \mu\text{m} \pm 0,01 \mu\text{m}$ ).

### temps

12 heures  $\pm 0,1$  heure assurent l'uniformité (écart  $< 2 \% \pm 0,5 \%$ ),  $> 24$  heures provoquent une usure excessive ( $Fe > 0,03 \% \pm 0,005 \%$ ) et la ténacité diminue de  $3 \% \pm 0,5 \%$ .

### moyen

L'éthanol réduit l'énergie de surface ( $< 0,1 \text{ J/m}^2 \pm 0,02 \text{ J/m}^2$ ) et l'agglomération de  $5 \% \pm 1 \%$ . L'eau (pureté  $> 99,9 \% \pm 0,01 \%$ ) est peu coûteuse, mais augmente la teneur en O de  $0,05 \% \pm 0,01 \%$ .

### Matériau de la balle

Les billes WC (pureté  $> 99,5 \% \pm 0,01 \%$ ) sont moins contaminées ( $Fe < 0,01 \% \pm 0,002 \%$ ) et sont meilleures que les billes d'acier ( $Fe > 0,1 \% \pm 0,02 \%$ ).

Par exemple, le broyage humide (10:1  $\pm 0,5$ , 300 tr/min  $\pm 10$  tr/min, 12 h  $\pm 0,1$  h, billes WC) produit une poudre mixte (WC  $0,3 \mu\text{m} \pm 0,01 \mu\text{m}$ ) pour les forets PCB (durée de vie  $> 10^5$  trous  $\pm 10^4$  trous).

## Demande d'ingénierie

### Broyage humide

WC  $0,5 \mu\text{m} \pm 0,01 \mu\text{m}$ , Co  $0,8 \mu\text{m} \pm 0,01 \mu\text{m}$  sont utilisés pour les outils de coupe (aviation, usure  $< 0,1 \text{ mm} \pm 0,02 \text{ mm}$ ).

### Broyage à sec

La formulation à faible teneur en Co ( $6 \% \pm 1 \%$ ) est utilisée pour les moules (extrusion  $> 10^5$  fois  $\pm 10^4$  fois), avec une déformation  $< 0,01 \text{ mm} \pm 0,002 \text{ mm}$ .

**à sec et broyage humide dans le processus de broyage à boulets pour le prétraitement des matières premières en carbure cémenté**

#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

catégorie	paramètre Caractéristiques	Broyage à sec	Broyage humide
Technologie paramètre	moyen	Pas de milieu liquide, uniquement de l'air ou un gaz inerte (tel que Ar , O <sub>2</sub> < 10 ppm±1 ppm).	Milieu liquide (tel que l'eau, l'éthanol, l'acétone), concentration 50%-70%±2% ( rapport solide-liquide).
	Rapport bille/matériau	5:1 à 10:1±0,1, plus élevé pour garantir l'efficacité du broyage.	3:1 à 8:1±0,1, le milieu liquide réduit la friction, le rapport bille/matériau peut être légèrement inférieur.
	Vitesse	200-400 tr/min ± 10 tr/min. Une vitesse trop élevée (> 500 tr/min) peut entraîner une surchauffe et une agglomération (> 10 % ± 1 %).	300-500 tr/min ± 10 tr/min, refroidissement liquide, la vitesse peut être légèrement supérieure et le taux d'agglomération est < 5 % ± 1 %.
	Affûtage temps	10 à 20 heures ± 0,5 heure. Une durée prolongée peut entraîner une surchauffe. Écart granulométrique > 10 % ± 1 %.	5 à 15 heures ± 0,5 heure, efficacité liquide élevée, temps court, écart de taille des particules < 5 % ± 1 %.
	broyage à boulets moyen	Billes en carbure (HRC 65-75±2), billes en ZrO <sub>2</sub> (HRC 70-80±2), diamètre 2-10 mm±0,1 mm.	Billes en carbure, billes en ZrO <sub>2</sub> , billes en acier inoxydable (HRC 25-35±2), diamètre 1-5 mm±0,1 mm.
	température contrôle	Dissipation naturelle de la chaleur, la température est facile à augmenter (> 60 °C ± 2 °C) et un refroidissement intermittent est nécessaire (arrêt pendant 30 minutes ± 5 minutes toutes les 2 heures ± 0,1 heure).	Dissipation thermique du milieu liquide, température < 40°C±2°C, aucun refroidissement supplémentaire requis.
	atmosphère contrôle	Gaz inerte (tel que Ar ou N <sub>2</sub> , O <sub>2</sub> < 10 ppm±1 ppm), empêche l'oxydation (O<0,05%±0,01%).	Le milieu liquide isole l'air et le taux d'oxydation est inférieur à 0,03 % ± 0,005 %. L'air ou une atmosphère inerte peuvent être utilisés.
	Ajouter à Agent	Ajouter de la cire de paraffine (1%-2%±0,1%) par voie sèche pour améliorer la fluidité (<30 s/50 g±2 s).	PVA ou PEG ajouté par voie humide (1%-3%±0,1%), dissous dans le milieu et améliorant la dispersibilité (>95%±1%).
	poudre Taille des particules	Convient pour le broyage grossier (1-10 µm±0,01 µm), l'efficacité du raffinage à 0,5 µm±0,01 µm est faible.	Convient pour le broyage fin et le broyage ultrafin (0,1-1 µm±0,01 µm), avec une efficacité de raffinage élevée et un écart de distribution <5%±1%.
	pureté contrôle	Les impuretés (telles que Fe < 0,02 % ± 0,005 %) sont facilement introduites et doivent être éliminées par décapage.	Le milieu liquide contient moins d'impuretés (Fe < 0,01 % ± 0,002 %) et une pureté plus élevée (> 99,9 % ± 0,01 %).
sec étape	Pas besoin de sécher, il suffit d'appuyer directement.	Doit être séché (séchage sous vide, 80°C±2°C, <10 <sup>-2</sup> Pa ± 10 <sup>-3</sup> Pa) pendant 4 à 8 heures ±	

**COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT**

catégorie	paramètre	Broyage à sec	Broyage humide
Caractéristiques	Caractéristiques		0,5 heure.
	Consommation d'énergie	Plus élevé (50-80 kWh $\pm$ 5 kWh par tonne de poudre) en raison du frottement élevé.	Faible (30-50 kWh $\pm$ 5 kWh par tonne de poudre), le liquide réduit les frottements.
Caractéristiques	Processus Propreté	Le procédé est simple, ne nécessite pas d'équipement supplémentaire et convient à la production à grande échelle (> 1 tonne/lot).	Le processus est relativement compliqué et nécessite un équipement de séchage adapté au traitement fin.
	Taille des particules distribué	Largeur de distribution ((D90-D10)/D50 >2,0 $\pm$ 0,2), uniformité <90% $\pm$ 1%.	La distribution est étroite ((D90-D10)/D50 <1,5 $\pm$ 0,1) et l'uniformité est >95% $\pm$ 1%.
	Taux de retrouvailles	La température élevée (> 10 % $\pm$ 1 %) et les additifs doivent être contrôlés.	Faible (<5% $\pm$ 1%), efficacement dispersé dans les milieux liquides.
	Oxydation contrôle	Une atmosphère inerte est requise et le taux d'oxydation peut être > 0,05 % $\pm$ 0,01 %.	Isolation liquide, taux d'oxydation < 0,03 % $\pm$ 0,005 %.
Avantages et inconvénients	avantage	Faible coût (investissement en équipement réduit, aucune étape de séchage, adapté au traitement grossier).	Haute efficacité de raffinage et haute pureté, adapté aux poudres ultrafines (<0,5 $\pm$ 0,01 $\mu$ m).
	défaut	La capacité de raffinage est limitée, il est facile de s'agglomérer et une température élevée (> 60 °C $\pm$ 2 °C) conduit à l'oxydation.	Le besoin de séchage augmente la consommation d'énergie (10-20 kWh/t $\pm$ 2 kWh) et le liquide peut introduire de l'humidité (>0,1% $\pm$ 0,01%).
Scénario d'application	En vigueur portée	Mélange de particules grossières (> 5 $\mu$ m $\pm$ 0,01 $\mu$ m) pour une production à faible coût (par exemple, ébauches de forets miniers).	Poudres submicroniques et nanométriques (<0,5 $\mu$ m $\pm$ 0,01 $\mu$ m), moulage de haute précision (tels que les outils d'aviation).
	Exemples	Poudre de WC-Co (D50=5 $\mu$ m $\pm$ 0,01 $\mu$ m), résistance à la flexion>3800 MPa $\pm$ 100 MPa, durée de vie>1200 m $\pm$ 100 m.	Poudre WC (D50=0,3 $\mu$ m $\pm$ 0,01 $\mu$ m), dureté HV>3000 $\pm$ 50, durée de vie>15 heures $\pm$ 1 heure.
Suggestions d'optimisation	broyage à boulets moyen	Utiliser des billes de carbure (HRC 65-75 $\pm$ 2) pour réduire la contamination (Fe <0,01% $\pm$ 0,002%).	Utiliser des billes de ZrO <sub>2</sub> (HRC 70-80 $\pm$ 2) pour éviter la contamination (O<0,03% $\pm$ 0,005%).
	Ajouter à Optimisation du dosage	1% $\pm$ 0,1% de cire de paraffine, réduit le taux d'agrégation (<5% $\pm$ 1%).	1%-3% $\pm$ 0,1% PVA ou PEG, pour améliorer la dispersion (uniformité>95% $\pm$ 1%).
	température contrôle	Fonctionnement intermittent (30 minutes $\pm$ 5 minutes arrêt toutes les 2 heures $\pm$ 0,1 heure), < 50°C $\pm$ 2°C.	Refroidissement liquide, aucun contrôle supplémentaire requis, <40°C $\pm$ 2°C.
	atmosphère optimisation	Atmosphère Ar ou N <sub>2</sub> (O <sub>2</sub> < 10 ppm $\pm$ 1 ppm), oxydation < 0,03 % $\pm$ 0,005 %.	Milieu éthanol (pureté > 99,5 % $\pm$ 0,1 %), rapport solide-liquide 60 % $\pm$ 2 %, oxydation <

**COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT**

catégorie	paramètre	Broyage à sec	Broyage humide
	Caractéristiques		0,01 % ± 0,002 %.
	Post-traitement	Pas besoin de sécher, il suffit d'appuyer directement.	Séchage sous vide (80°C±2°C, <math>10^{-2}</math> Pa ± 10 <sup>-3</sup> Pa), humidité <math><0,05\% \pm 0,01\%</math>.
	Consommation d'énergie optimisation	Optimisez la vitesse de rotation (<math><400</math> tr/min±10 tr/min) et réduisez la consommation d'énergie de 10%±2%.	Optimisez le temps de séchage (<math><6</math> heures ± 0,5 heure) et réduisez la consommation d'énergie de 5% ± 1%.
illustrer	Le broyage à sec et le broyage humide présentent des caractéristiques spécifiques pour le prétraitement des matières premières en carbure cimenté. Le broyage à sec est simple (pas de séchage requis) et peu coûteux (consommation énergétique de 50 à 80 kWh/t±5 kWh), adapté au broyage grossier (> 5 μm±0,01 μm), mais avec une large distribution (> 2,0 ± 0,2) et un taux d'agglomération élevé (> 10 % ± 1 %). Le broyage humide présente l'avantage d'un rendement de raffinage élevé (99,9 % ± 0,01 %), adapté aux applications de haute précision, mais nécessite un séchage (consommation énergétique de 30 à 50 kWh/t±5 kWh). En optimisant le rapport bille/matériau (broyage à sec 5:1-10:1±0,1, broyage humide 3:1-8:1±0,1), la vitesse de rotation (broyage à sec 200-400 tr/min±10 tr/min, broyage humide 300-500 tr/min±10 tr/min) et la sélection des supports, le broyage à sec prend en charge les forets miniers (durée de vie > 1200 m±100 m) et le broyage humide prend en charge les outils d'aviation (durée de vie > 15 heures±1 heure), répondant à des besoins divers.		

### 4.3.2 Technologie de séchage par atomisation et de granulation

La technologie de séchage par atomisation et de granulation est le processus principal du prétraitement des matières premières en carbure cimenté (telles que la poudre de carbure de tungstène WC, la poudre de cobalt Co et la poudre de nickel Ni), qui est utilisée pour transformer la poudre fine en particules avec d'excellentes propriétés de fluidité et de pressage.

#### (1) Principes de la technologie de séchage par atomisation et de granulation

##### Séchage par atomisation :

Procédé : La suspension ou la boue contenant du WC, du Co et d'autres poudres est pulvérisée en minuscules gouttelettes (10-200 μm±0,1 μm) à travers un atomiseur, et l'eau est rapidement évaporée (taux d'évaporation > 90 %±2 %/s) dans un flux d'air à haute température (150-300°C±5°C) pour former des particules sèches.

Transfert de chaleur et de masse : l'eau à la surface de la gouttelette s'évapore en premier, puis l'eau interne migre par diffusion. Le temps de séchage est <math><1</math> s ± 0,1 s.

Cible : granulométrie 20-150 μm±0,1 μm, fluidité <math><20</math> s/50 g±2 s (GB/T 1482-2010), masse volumique apparente >math>1,5</math> g/cm<sup>3</sup> ± 0,1 g/cm<sup>3</sup>.

##### Granulation:

Procédé : Dans le séchage par atomisation, les liants (tels que le PVA, le PEG) favorisent l'adhérence

#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

des particules dans les gouttelettes, et la tension superficielle ( $< 0,07 \text{ N/m} \pm 0,01 \text{ N/m}$ ) forme des particules sphériques ou presque sphériques.

Mécanisme : Les particules entrent en collision et se lient pendant le processus de séchage, et le liant se solidifie pour former une structure en réseau (porosité  $< 10 \% \pm 1 \%$ ), ce qui améliore la résistance des particules.

Cible : résistance à la compression du corps vert  $> 10 \text{ MPa} \pm 1 \text{ MPa}$ , uniformité de densité après pressage  $> 98 \% \pm 1 \%$ .

## (2) Paramètres du processus

### Concentration de l'alimentation :

Plage :  $20 \% - 40 \% \pm 1 \%$  (fraction massique solide).

Impact : Une concentration  $< 15 \% \pm 1 \%$  entraîne des particules trop fines ( $< 20 \mu\text{m} \pm 0,1 \mu\text{m}$ ) et une mauvaise fluidité ( $> 30 \text{ s}/50 \text{ g} \pm 2 \text{ s}$ ) ;  $> 45 \% \pm 1 \%$  entraîne une viscosité trop élevée ( $> 1000 \text{ mPa}\cdot\text{s} \pm 50 \text{ mPa}\cdot\text{s}$ ) et un colmatage de la buse.

Optimisation :  $25\% - 30\% \pm 1\%$ , taille des particules  $50 - 100 \mu\text{m} \pm 0,1 \mu\text{m}$ , viscosité  $300 - 500 \text{ mPa}\cdot\text{s} \pm 50 \text{ mPa}\cdot\text{s}$ .

### Débit d'alimentation :

Plage :  $5 - 20 \text{ L/h} \pm 0,5 \text{ L/h}$  (petits et moyens équipements),  $50 - 200 \text{ L/h} \pm 5 \text{ L/h}$  (gros équipements).

Impact : Débit  $< 5 \text{ L/h} \pm 0,5 \text{ L/h}$ , séchage irrégulier, eau résiduelle  $> 1 \% \pm 0,2 \%$  ;  $> 25 \text{ L/h} \pm 0,5 \text{ L/h}$ , particules trop grosses ( $> 200 \mu\text{m} \pm 0,1 \mu\text{m}$ ) et la densité apparente diminue.

Optimisation :  $10 - 15 \text{ L/h} \pm 0,5 \text{ L/h}$  (petit et moyen),  $100 - 150 \text{ L/h} \pm 5 \text{ L/h}$  (grand), efficacité de séchage  $> 95 \% \pm 1 \%$ .

### Température de l'air d'admission :

Plage :  $150 - 300^\circ\text{C} \pm 5^\circ\text{C}$  (température de sortie  $80 - 120^\circ\text{C} \pm 2^\circ\text{C}$ ).

Impact : Température  $< 150^\circ\text{C} \pm 5^\circ\text{C}$ , séchage incomplet, eau résiduelle  $> 1 \% \pm 0,2 \%$ , viscosité élevée des particules ;  $> 350^\circ\text{C} \pm 5^\circ\text{C}$ , le liant se décompose (carbone résiduel  $> 0,3 \% \pm 0,01 \%$ ) et la fragilité des particules augmente.

Optimisation :  $200 - 250^\circ\text{C} \pm 5^\circ\text{C}$ , eau résiduelle  $< 0,2\% \pm 0,05\%$ , taux de rétention du liant  $> 90\% \pm 2\%$ .

### Pression d'atomisation :

Plage :  $0,1 - 0,3 \text{ MPa} \pm 0,01 \text{ MPa}$  (type pression),  $0,2 - 0,4 \text{ MPa} \pm 0,01 \text{ MPa}$  (type débit d'air).

Impact : Lorsque la pression est  $< 0,1 \text{ MPa} \pm 0,01 \text{ MPa}$ , les gouttelettes sont grosses ( $> 200 \mu\text{m} \pm 0,1 \mu\text{m}$ ) et le séchage est irrégulier ; lorsque la pression est  $> 0,4 \text{ MPa} \pm 0,01 \text{ MPa}$ , les gouttelettes sont trop petites ( $< 20 \mu\text{m} \pm 0,1 \mu\text{m}$ ) et la fluidité est mauvaise.

Optimisation :  $0,2 - 0,25 \text{ MPa} \pm 0,01 \text{ MPa}$ , taille des gouttelettes  $50 - 100 \mu\text{m} \pm 0,1 \mu\text{m}$ , uniformité de distribution  $> 95 \% \pm 1 \%$ .

### Dosage du liant :

Plage :  $1\% - 5\% \pm 0,1\%$  (PVA, PEG, paraffine).

Impact : Un dosage  $< 1 \% \pm 0,1 \%$  entraînera une résistance insuffisante des particules ( $< 5 \text{ MPa} \pm 0,5 \text{ MPa}$ ) ;  $> 7 \% \pm 0,1 \%$  entraînera une augmentation du carbone résiduel ( $> 0,2 \% \pm 0,01 \%$ ) et une porosité frittée  $> 0,2 \% \pm 0,02 \%$ .

Optimisation :  $2\% - 3\% \pm 0,1\%$ , résistance  $> 12 \text{ MPa} \pm 1 \text{ MPa}$ , carbone résiduel  $< 0,1\% \pm 0,01\%$ .

#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

### (3) Types et caractéristiques des équipements de séchage par atomisation et de granulation

#### **Sécheur par atomisation centrifuge :**

Principe de fonctionnement : Le disque rotatif à grande vitesse (1000-20000 tr/min  $\pm$  50 tr/min) projette la boue en gouttelettes, et l'air chaud (200-300°C  $\pm$  5°C) la sèche.

Caractéristiques:

des particules : 20-120  $\mu\text{m} \pm 0,1 \mu\text{m}$  , sphéricité  $> 90 \% \pm 2 \%$ .

Débit : 100-1000 kg/h  $\pm 10$  kg/h (selon le diamètre du disque).

Avantages : Convient aux boues à haute viscosité ( $< 1000 \text{ mPa} \cdot \text{s} \pm 50 \text{ mPa} \cdot \text{s}$  ) , distribution étroite des particules ((D90-D10)/D50  $< 1,5 \pm 0,1$ ).

Inconvénients : vitesse élevée ( $> 15000 \text{ tr/min} \pm 50 \text{ tr/min}$ ), usure facile du disque (durée de vie  $< 500$  heures  $\pm 50$  heures), coût de maintenance élevé.

Application : Granulation de poudre WC-Co à grande échelle (D50=50  $\mu\text{m} \pm 0,1 \mu\text{m}$  ) pour les outils aéronautiques.

#### **Sécheur par pulvérisation sous pression :**

Principe de fonctionnement : une pompe haute pression (0,1-0,3 MPa  $\pm 0,01$  MPa) atomise à travers des buses, l'air chaud (150-250°C  $\pm 5$ °C) sèche.

Caractéristiques:

des particules : 30-150  $\mu\text{m} \pm 0,1 \mu\text{m}$  , sphéricité  $> 95 \% \pm 2 \%$ .

Débit : 50-500 kg/h  $\pm 5$  kg/h.

Avantages : Conception de buse flexible (trou unique ou multi-trou), adaptée aux boues à faible viscosité ( $< 500 \text{ mPa} \cdot \text{s} \pm 50 \text{ mPa} \cdot \text{s}$  ) , faible consommation d'énergie ( $< 60 \text{ kWh/t} \pm 5 \text{ kWh}$ ).

Inconvénients : Les buses s'encrassent facilement (nettoyer toutes les 100 heures  $\pm 10$  heures), et la production est limitée.

Application : Granulation fine de poudre WC-Ni (D50=80  $\mu\text{m} \pm 0,1 \mu\text{m}$  ) , utilisée pour le corps de pompe chimique.

#### **Sécheur par pulvérisation à flux d'air :**

Principe de fonctionnement : De l'air comprimé (0,2-0,4 MPa  $\pm 0,01$  MPa) est mélangé à la boue pour l'atomisation, et de l'air chaud (180-280°C  $\pm 5$ °C) est utilisé pour le séchage.

Caractéristiques:

des particules : 20-80  $\mu\text{m} \pm 0,1 \mu\text{m}$  , sphéricité  $> 90 \% \pm 2 \%$ .

Débit : 30-300 kg/h  $\pm 5$  kg/h.

la dispersion de poudre fine (taille initiale des particules  $< 1 \mu\text{m} \pm 0,01 \mu\text{m}$  ) , uniformité des particules  $> 96 \% \pm 1 \%$  , convient aux exigences de pureté élevée ( $O < 0,03 \% \pm 0,005 \%$ ).

Inconvénients : consommation énergétique élevée ( $> 80 \text{ kWh/t} \pm 5 \text{ kWh}$ ), coûts de compression d'air accrus.

Application : Granulation de poudre Nano WC (D50=30  $\mu\text{m} \pm 0,1 \mu\text{m}$  ) , utilisée pour les forets PCB.

#### **Sécheur par atomisation bi-fluide :**

#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

Principe de fonctionnement : Le liquide et l'air comprimé sont co-atomisés via une buse à double fluide (0,1-0,3 MPa±0,01 MPa) et séchés par de l'air chaud (200-300°C±5°C).

Caractéristiques:

des particules : 10-100 µm±0,1 µm , sphéricité > 92 %±2 %.

Débit : 50-400 kg/h±5 kg/h.

Avantages : La taille des particules atomisées est contrôlable (ajustée par le rapport gaz-liquide), adaptée aux boues à haute teneur en solides (> 30 % ± 1 %).

Inconvénients : L'équipement est complexe et nécessite un entretien fréquent (vérifier la buse toutes les 200 heures ± 20 heures).

Application : Granulation de poudre mixte WC-Co (D50=60 µm±0,1 µm) , utilisée pour les moules résistants à l'usure.

#### **Petit séchoir à atomisation de laboratoire :**

Principe de fonctionnement : petite conception centrifuge ou sous pression (vitesse 5000-10000 tr/min ± 50 tr/min, pression 0,1-0,2 MPa ± 0,01 MPa), air chaud 150-200°C ± 5°C.

Caractéristiques:

des particules : 20-80 µm±0,1 µm , débit 0,5-5 kg/h±0,1 kg/h.

Avantages : Convient à la R&D et à la production d'essai, réglage flexible des paramètres (température ± 5 °C, débit ± 0,1 L/h).

Inconvénients : faible rendement et coût élevé (prix de l'équipement > 5000 USD ± 500 USD).

Application : Test de poudre WC-Ni en petits lots (D50=40 µm±0,1 µm) .

#### **(4) Facteurs d'influence**

##### **Caractéristiques du liant :**

Taille des particules : La poudre initiale < 1 µm ± 0,01 µm permet de former facilement des particules uniformes ; > 5 µm ± 0,01 µm conduit à des particules grossières ou irrégulières.

Viscosité : 200-800 mPa·s±50 mPa·s est optimal ; > 1000 mPa·s±50 mPa·s obstrueront la buse.

##### **Type de liant :**

Le PVA (2 % ± 0,1 %) améliore la résistance (> 12 MPa ± 1 MPa), mais présente une hygroscopicité élevée (> 2 % ± 0,2 %).

Le PEG (2 % ± 0,1 %) a amélioré la fluidité (< 20 s/50 g ± 2 s), mais le résidu de carbone était légèrement plus élevé (< 0,15 % ± 0,01 %).

La cire de paraffine (1%-2%±0,1%) convient à la fluidité après séchage, mais elle est très volatile (>80°C±2°C).

##### **Conditions environnementales :**

Humidité <50% RH±5%, température <30°C±2°C, pour éviter la volatilisation prématurée du liant ou l'absorption d'humidité des particules.

##### **Facteurs d'équipement :**

L'usure des buses (durée de vie < 500 heures ± 50 heures) provoque des gouttelettes inégales et nécessite un remplacement régulier.

#### **(5) Stratégie d'optimisation**

##### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

### **Préparation du lisier :**

Un broyage humide (300-500 tr/min  $\pm$  10 tr/min, 5-15 h  $\pm$  0,5 h) a été utilisé pour préparer une suspension homogène (taille des particules  $< 1 \mu\text{m} \pm 0,01 \mu\text{m}$ , viscosité 300-500 mPa·s  $\pm$  50 mPa·s).

Dispersion ultrasonore (40 kHz $\pm$ 1 kHz, 10 min $\pm$  1 min), taux d'agglomération  $< 5\% \pm 1\%$ .

### **Réglage des paramètres du processus :**

La concentration d'alimentation est de 25 %  $\pm$  1 %, la température de l'air d'entrée est de 220 °C  $\pm$  5 °C, la pression d'atomisation est de 0,2 MPa  $\pm$  0,01 MPa et la taille des particules est de 50 à 80  $\mu\text{m} \pm 0,1 \mu\text{m}$ .

Liant : 2% $\pm$ 0,1% PVA + 1% $\pm$ 0,1% PEG, résistance  $> 12 \text{ MPa} \pm 1 \text{ MPa}$ , fluidité  $< 20 \text{ s}/50 \text{ g} \pm 2 \text{ s}$ .

### **Entretien du matériel :**

Nettoyez la buse (une fois par semaine, utilisez de l'éthanol, pureté  $> 99,5 \% \pm 0,1 \%$ ) pour éviter le colmatage.

Remplacer le disque ou la buse d'atomisation (toutes les 500 heures  $\pm$  50 heures), l'écart de vitesse est  $< 5\% \pm 1\%$ .

### **Post-traitement :**

Tamis (100-150  $\mu\text{m} \pm 0,1 \mu\text{m}$ ) pour éliminer les particules surdimensionnées ( $< 5\% \pm 1\%$ ).

Séchage sous vide (80°C $\pm$ 2°C,  $< 10^{-2} \text{ Pa} \pm 10^{-3} \text{ Pa}$ , 4-6 heures $\pm$ 0,5 heures), eau résiduelle  $< 0,1\% \pm 0,01\%$ .

## **(6) Effet de l'application**

### **Propriétés de fluidité et de compression :**

Fluidité  $< 20 \text{ s}/50 \text{ g} \pm 2 \text{ s}$ , densité du corps vert  $> 60\% \pm 1\%$  (densité théorique), défauts de pressage  $< 1\% \pm 0,2\%$ .

Exemple : WC-10%Co (D50=50  $\mu\text{m} \pm 0,1 \mu\text{m}$ ), durée de vie de l'ébauche d'outil d'aviation  $> 15$  heures  $\pm$  1 heure.

### **Performances de frittage :**

Densité  $> 99 \% \pm 0,1 \%$ , porosité  $< 0,05 \% \pm 0,01 \%$ , dureté HV  $> 2900 \pm 50$ , résistance à la flexion  $> 4200 \text{ MPa} \pm 100 \text{ MPa}$ .

Exemple : WC-12%Ni (D50=80  $\mu\text{m} \pm 0,1 \mu\text{m}$ ), durée de vie du corps de la pompe chimique  $> 2$  ans $\pm$ 0,2 an.

### **cohérence:**

L'écart de taille des particules entre les lots est  $< 5 \% \pm 1 \%$ , l'uniformité est  $> 95 \% \pm 1 \%$  et les défauts de frittage sont réduits de  $50 \% \pm 5 \%$ .

## **(7) Tests et contrôle qualité**

Distribution granulométrique : analyse granulométrique au laser (GB/T 19077.1-2008), D50 50-100  $\mu\text{m} \pm 0,1 \mu\text{m}$ , (D90-D10)/D50  $< 1,5 \pm 0,1$ .

Analyse morphologique : SEM (GB/T 16594-2008), sphéricité  $> 90 \% \pm 2 \%$ , taux d'agglomération  $< 5 \% \pm 1 \%$ .

Teneur en humidité : méthode Karl Fischer (GB/T 6283-2008), eau résiduelle  $< 0,2 \% \pm 0,05 \%$ .

Essai de résistance : résistance à la compression (GB/T 3851-2015),  $> 10 \text{ MPa} \pm 1 \text{ MPa}$ .

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

Détection de carbone résiduel : méthode d'absorption infrarouge (GB/T 5124-2017), carbone résiduel  $< 0,1 \% \pm 0,01 \%$ .

Surveillance en ligne : l'imagerie thermique infrarouge surveille la température de l'air d'admission (écart  $< 5 \text{ }^\circ\text{C} \pm 1 \text{ }^\circ\text{C}$ ) et le débitmètre surveille l'alimentation (écart  $< 1 \% \pm 0,1 \%$ ).

La technologie de séchage par atomisation et de granulation convertit les poudres fines telles que WC et Co en particules de  $20 \text{ à } 150 \text{ } \mu\text{m} \pm 0,1 \text{ } \mu\text{m}$  par atomisation (pression de  $0,2 \text{ à } 0,25 \text{ MPa} \pm 0,01 \text{ MPa}$ ) et séchage à haute température ( $200 \text{ à } 250 \text{ }^\circ\text{C} \pm 5 \text{ }^\circ\text{C}$ ), améliorant considérablement la fluidité ( $< 20 \text{ s}/50 \text{ g} \pm 2 \text{ s}$ ) et la résistance du corps vert ( $> 10 \text{ MPa} \pm 1 \text{ MPa}$ ). Français Les types d'équipements comprennent la centrifugeuse (haut rendement,  $100\text{-}1000 \text{ kg/h} \pm 10 \text{ kg/h}$ ), la pression (haute sphéricité,  $50\text{-}500 \text{ kg/h} \pm 5 \text{ kg/h}$ ), le flux d'air (particules fines,  $30\text{-}300 \text{ kg/h} \pm 5 \text{ kg/h}$ ), le double fluide (taille des particules contrôlable,  $50\text{-}400 \text{ kg/h} \pm 5 \text{ kg/h}$ ) et la petite machine de laboratoire (pour la recherche et le développement,  $0,5\text{-}5 \text{ kg/h} \pm 0,1 \text{ kg/h}$ ), chacun avec ses propres avantages uniques. L'optimisation de la concentration d'alimentation ( $25 \% \text{-} 30 \% \pm 1 \%$ ), du dosage du liant ( $2 \% \text{-} 3 \% \pm 0,1 \%$ ) et de la maintenance de l'équipement peut garantir l'uniformité des particules ( $> 95 \% \pm 1 \%$ ) et les performances de frittage (densité  $> 99 \% \pm 0,1 \%$ ). Il est largement utilisé dans les domaines haut de gamme tels que les outils aéronautiques (durée de vie  $> 15 \text{ heures} \pm 1 \text{ heure}$ ), les équipements chimiques (durée de vie  $> 2 \text{ ans} \pm 0,2 \text{ an}$ ), etc.

#### 4.4 Caractérisation de la poudre

Caractérisation de la poudre La qualité de la poudre mélangée est évaluée par la granulométrie Fisher (FSSS,  $0,250 \text{ } \mu\text{m} \pm 0,01 \text{ } \mu\text{m}$ ), la masse volumique libre, la masse volumique tassée ( $4,06,2 \text{ g/cm}^3 \pm 0,1 \text{ g/cm}^3$ ) et la coulabilité ( $1316 \text{ secondes}/50 \text{ g} \pm 0,5 \text{ secondes}$ ) pour garantir les performances de frittage (densité  $> 99 \% \pm 0,1 \%$ , écart de dureté  $< \pm 30 \text{ HV}$ ). La méthode de caractérisation est basée sur la dynamique des particules (sédimentation de Stokes, écoulement de Hagen-Poiseuille) et est conforme aux normes ISO 4499 et ASTM B330.

##### 4.4.1 Taille des particules de Fisher (FSSS, $0,250 \text{ } \mu\text{m}$ )

Le granulomètre Fisher (FSSS) est une méthode traditionnelle de détermination de la taille moyenne des particules de poudre par perméation à l'air. Il est largement utilisé pour l'analyse granulométrique des matières premières en carbure cémenté (comme la poudre de carbure de tungstène WC). Il repose sur la relation entre la résistance de la couche de poudre à l'air et la taille des particules. La mesure de la perméabilité à l'air sous une certaine pression permet de calculer la taille moyenne des particules (généralement en microns). La granulométrie Fisher est adaptée aux particules fines ( $0,1 \text{ à } 50 \text{ } \mu\text{m}$ ). Les résultats reflètent la surface spécifique et les caractéristiques des pores de la poudre et constituent une référence importante pour les performances de frittage et de pressage du carbure cémenté.

#### Méthodes de caractérisation et signification Fisher

##### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

La granulométrie de (FSSS) a été mesurée par la méthode de perméabilité à l'air pour mesurer la taille moyenne des particules de la poudre ( $0,250 \mu\text{m} \pm 0,01 \mu\text{m}$ ), sur la base de la loi de Darcy (perméabilité  $\sim 10^{-12} \text{m}^2 \pm 10^{-13} \text{m}^2$ ). La FSSS de la poudre mélangée contenant  $10\% \pm 1\%$  de Co est de  $0,55 \mu\text{m} \pm 0,01 \mu\text{m}$ , WC de  $0,33 \mu\text{m} \pm 0,01 \mu\text{m}$  et Co de  $0,51 \mu\text{m} \pm 0,01 \mu\text{m}$ . Les particules fines FSSS ( $< 0,5 \mu\text{m} \pm 0,01 \mu\text{m}$ ) améliorent la dureté ( $\text{HV} > 2\,200 \pm 30$ ) et les particules de grande taille ( $> 5 \mu\text{m} \pm 0,01 \mu\text{m}$ ) améliorent la ténacité ( $K_{Ic} > 18 \text{MPa}\cdot\text{m}^{1/2} \pm 0,5$ ). Conditions d'essai : masse de l'échantillon  $5 \text{g} \pm 0,1 \text{g}$ , pression  $0,1 \text{MPa} \pm 0,01 \text{MPa}$ , pureté de l'air  $> 99,9\% \pm 0,01\%$ , erreur  $< 2\% \pm 0,5\%$ .

Par exemple, la poudre FSSS  $0,3 \mu\text{m} \pm 0,01 \mu\text{m}$  est utilisée pour les outils de coupe aéronautiques (usure  $< 0,08 \text{mm} \pm 0,02 \text{mm}$ ), dureté HV  $2300 \pm 30$ , durée de vie  $> 15 \text{h} \pm 1 \text{h}$  ; la poudre FSSS  $5 \mu\text{m} \pm 0,01 \mu\text{m}$  est utilisée pour les forets miniers ( $K_{Ic} > 20 \text{MPa}\cdot\text{m}^{1/2} \pm 0,5$ ), durée de vie  $> 1200 \text{m} \pm 100 \text{m}$ .

### Facteurs d'influence et optimisation

La mesure FSSS est affectée par les facteurs suivants :

Composition de la poudre : WC/Co=90:10±1%, FSSS  $0,5\mu\text{m}\pm 0,01\mu\text{m}$  ; WC/Ni=88:12±1%, FSSS  $1\mu\text{m}\pm 0,01\mu\text{m}$ , car la taille des particules de Ni est plus grande ( $> 2\mu\text{m}\pm 0,01\mu\text{m}$ ).

Durée du broyage à billes :  $12 \text{h} \pm 0,1 \text{h}$ , FSSS a diminué de  $10\% \pm 2\%$  ( $0,5 \mu\text{m} \pm 0,01 \mu\text{m}$ ) ;  $> 24 \text{h}$  d'agglomération accrue ( $> 5\% \pm 1\%$ ) et FSSS a augmenté de  $5\% \pm 1\%$ .

Additifs :  $0,5\% \pm 0,01\%$  VC réduit le FSSS de  $5\% \pm 1\%$  ( $0,3 \mu\text{m} \pm 0,01 \mu\text{m}$ ),  $\text{Cr}_3\text{C}_2$  affecte  $< 2\% \pm 0,5\%$ .

Humidité ambiante :  $< 50\% \pm 5\%$ , éviter l'agglomération ( $< 5\% \pm 1\%$ ), erreur FSSS  $< 1\% \pm 0,2\%$ .

Étalonnage de l'équipement : erreur de porosité de l'instrument FSSS  $< 0,1\% \pm 0,02\%$ , réduction d'erreur  $1\% \pm 0,2\%$ .

Par exemple, la poudre FSSS  $0,3 \mu\text{m} \pm 0,01 \mu\text{m}$  (broyage humide 12 heures,  $0,5\% \pm 0,01\%$  VC) est utilisée pour les forets PCB (durée de vie  $> 10^5$  trous  $\pm 10^4$  trous).

### Taille des particules de Fisher ( FSSS) application d'ingénierie

#### Outils de coupe ultra-durs

FSSS  $0,20,5 \mu\text{m} \pm 0,01 \mu\text{m}$ , dureté HV  $> 2300 \pm 30$ , durée de vie du traitement aéronautique  $> 15$  heures  $\pm 1$  heure.

#### exploitation minière

FSSS  $35 \mu\text{m} \pm 0,01 \mu\text{m}$ ,  $K_{Ic} > 20 \text{MPa}\cdot\text{m}^{1/2} \pm 0,5$ , durée de vie du perçage  $> 1\,200 \text{m} \pm 100 \text{m}$ .

### 4.4.2 Masse volumique apparente, masse volumique après tassement et fluidité de la poudre

#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

## de carbure de tungstène

La masse volumique apparente, la masse volumique après tassement et la fluidité de la poudre de carbure de tungstène (WC) sont des indicateurs importants de ses propriétés physiques, qui influencent directement le comportement au pressage et au frittage du carbure cimenté, ainsi que les performances du produit final. Voici une analyse détaillée des aspects suivants : définition, méthode de mesure, facteurs d'influence, mesures d'optimisation et applications techniques.

### Masse volumique apparente de la poudre de carbure de tungstène

La densité libre fait référence à la densité de la poudre dans son état d'empilement naturel, reflétant les caractéristiques d'empilement et la porosité de la poudre.

#### Méthode de mesure

Conformément à la norme ASTM B212, 50 g  $\pm$  0,1 g de poudre ont été déposés librement dans un cylindre de mesure standard (volume 25 mL  $\pm$  0,1 mL) et le rapport masse/volume a été calculé.

#### Valeur typique

La masse volumique apparente de la poudre de WC pur est de 4,0 à 5,0 g/cm<sup>3</sup>  $\pm$  0,1 g/cm<sup>3</sup> et sa porosité est d'environ 40 %  $\pm$  2 %. La masse volumique apparente de la poudre mixte WC-Co contenant 10 %  $\pm$  1 % de Co est d'environ 4,5 g/cm<sup>3</sup>  $\pm$  0,1 g/cm<sup>3</sup>, car la masse volumique du Co (8,9 g/cm<sup>3</sup>  $\pm$  0,1 g/cm<sup>3</sup>) est supérieure à celle du WC (15,63 g/cm<sup>3</sup>  $\pm$  0,1 g/cm<sup>3</sup>) et les caractéristiques d'empilement changent après le mélange.

#### importance

La densité apparente élevée (> 4,5 g/cm<sup>3</sup>  $\pm$  0,1 g/cm<sup>3</sup>) indique que les particules sont étroitement disposées et que la porosité du corps vert pressé est faible (< 40 %  $\pm$  2 %), ce qui est propice à la densification par frittage (> 99 %  $\pm$  0,1 %).

### Densité de la poudre de carbure de tungstène

La densité de tapotement fait référence à la densité de la poudre dans un état densément tassé après vibration ou tapotement, ce qui reflète l'efficacité de remplissage entre les particules.

#### Méthode de mesure

Selon la norme ASTM B527, le changement de volume de poudre a été mesuré à l'aide d'un densimètre à percussion ( fréquence de vibration 50 Hz  $\pm$  1 Hz, amplitude 1 mm  $\pm$  0,1 mm, vibration 3000 fois  $\pm$  50 fois).

#### Valeur typique

La masse volumique après tassement de la poudre de WC pure est de 5,0 à 6,2 g/cm<sup>3</sup>  $\pm$  0,1 g/cm<sup>3</sup>, et sa porosité est réduite à 30 %  $\pm$  2 %. La masse volumique après tassement d'une poudre mélangée contenant 10 %  $\pm$  1 % de cobalt est d'environ 5,5 g/cm<sup>3</sup>  $\pm$  0,1 g/cm<sup>3</sup>.

#### importance

La densité de tassement élevée (> 5,5 g/cm<sup>3</sup>  $\pm$  0,1 g/cm<sup>3</sup>) indique que les particules peuvent être davantage remplies, le compact a une bonne consistance (écart dimensionnel < 0,01 mm  $\pm$  0,002 mm) et les propriétés après frittage sont stables (dureté HV > 2900  $\pm$  50).

Exemple : La masse volumique de la poudre après tassement est de 5,8 g/cm<sup>3</sup>  $\pm$  0,1 g/cm<sup>3</sup>. Après pressage, l'écart dimensionnel à l'état vert est inférieur à 0,01 mm  $\pm$  0,002 mm. L'outil aéronautique

#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

présente une dureté de HV 2200 ± 30 et une durée de vie supérieure à 12 heures ± 1 heure.

### **Fluidité de la poudre de carbure de tungstène**

La fluidité reflète la capacité d'écoulement de la poudre pendant le compactage, affectant l'uniformité du remplissage du moule et la qualité du produit.

Méthode de mesure

Conformément à la norme ASTM B213, un débitmètre à effet Hall (ouverture de l'entonnoir : 5 mm ± 0,1 mm) a été utilisé pour mesurer le temps nécessaire au passage de 50 g ± 0,1 g de poudre à travers l'entonnoir. L'écoulement est conforme à la loi de Hagen-Poiseuille et la résistance visqueuse est d'environ  $10^{-3} \text{ Pa}\cdot\text{s} \pm 10^{-4} \text{ Pa}\cdot\text{s}$ .

Valeur typique

La fluidité de la poudre WC est de 13 à 16 secondes/50 g ± 0,5 seconde, et la fluidité de la poudre mélangée contenant 10 % ± 1 % de Co est d'environ 14 secondes/50 g ± 0,5 seconde.

importance

Une excellente fluidité (<14 sec/50 g ± 0,5 sec) assure un remplissage uniforme du moule, une densité après frittage >99,5% ± 0,1% et réduit les défauts de moulage (fissures <1% ± 0,2%).

Exemple : La poudre avec une fluidité de 13 secondes/50 g ± 0,5 seconde a une uniformité de >98% ± 1% après pressage et est utilisée pour la production d'outils avec un écart dimensionnel de <0,01 mm ± 0,002 mm.

### **Facteurs d'influence et optimisation de la taille des particules de poudre de carbure de tungstène**

#### **Taille des particules (taille de première année, FSSS) :**

la taille des particules de Fisher est  $< 0,5 \mu\text{m} \pm 0,01 \mu\text{m}$ , la force de van der Waals entre les particules est augmentée ( $> 10^{-9} \text{ N} \pm 10^{-10} \text{ N}$ ), la masse volumique apparente chute à  $4,2 \text{ g/cm}^3 \pm 0,1 \text{ g/cm}^3$  et la fluidité diminue de 2 secondes ± 0,5 secondes (16 secondes/50 g ± 0,5 secondes). Lorsque la taille des particules de Fisher est  $> 5 \mu\text{m} \pm 0,01 \mu\text{m}$ , l'espace entre les particules diminue, la masse volumique apparente augmente à  $5,0 \text{ g/cm}^3 \pm 0,1 \text{ g/cm}^3$  et la fluidité augmente de 1 seconde ± 0,2 seconde (13 secondes/50 g ± 0,5 secondes).

Optimisation : Contrôler la granulométrie de la fibre de verre à  $0,5\text{-}3 \mu\text{m} \pm 0,01 \mu\text{m}$ , et équilibrer la densité et la fluidité (densité libre  $4,5 \text{ g/cm}^3 \pm 0,1 \text{ g/cm}^3$ , fluidité 14 s/50 g ± 0,5 s).

#### **Apparence:**

Français Les particules sphériques (taux de sphéroïdisation > 95 % ± 1 %) ont un faible coefficient de frottement de surface ( $< 0,2 \pm 0,02$ ), une augmentation de 5 % ± 1 % de la masse volumique tassée ( $6,0 \text{ g/cm}^3 \pm 0,1 \text{ g/cm}^3$ ) et une augmentation de 3 % ± 0,5 % de la fluidité (13 secondes/50 g ± 0,5 secondes). Les particules irrégulières (arêtes  $> 0,1 \mu\text{m} \pm 0,01 \mu\text{m}$ ) ont de grands espaces d'empilement et une diminution de 3 % ± 0,5 % de la masse volumique tassée ( $5,2 \text{ g/cm}^3 \pm 0,1 \text{ g/cm}^3$ ).

par séchage par atomisation (taille des particules  $50 \mu\text{m} \pm 0,1 \mu\text{m}$ , sphéricité > 90 % ± 2 %) a été utilisée pour améliorer la cohérence de la morphologie des particules.

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

### **Contenu du co:**

Français Lorsque la teneur en Co est de  $10 \% \pm 1 \%$ , la masse volumique tassée est de  $5,5 \text{ g/cm}^3 \pm 0,1 \text{ g/cm}^3$  et la fluidité est de  $14 \text{ s/50 g} \pm 0,5 \text{ s}$ . Lorsque la teneur en Co est  $> 15 \% \pm 1 \%$ , les particules de Co (masse volumique  $8,9 \text{ g/cm}^3 \pm 0,1 \text{ g/cm}^3$ ) sont inégalement réparties, la masse volumique tassée chute à  $5,2 \text{ g/cm}^3 \pm 0,1 \text{ g/cm}^3$ , et la fluidité diminue de  $1 \text{ s} \pm 0,2 \text{ s}$  ( $15 \text{ s/50 g} \pm 0,5 \text{ s}$ ).

Optimisation : La teneur en Co est contrôlée à  $8\%-12\% \pm 1\%$  pour assurer une densité et une fluidité optimales (densité tassée  $5,5-5,8 \text{ g/cm}^3 \pm 0,1 \text{ g/cm}^3$ , fluidité  $< 14 \text{ secondes/50 g} \pm 0,5 \text{ secondes}$ ).

### **humidité:**

Lorsque l'humidité ambiante est  $< 50 \% \pm 5 \% \text{ HR}$ , la fluidité est maintenue à  $14 \text{ s/50 g} \pm 0,5 \text{ s}$ . Lorsque l'humidité est  $> 80 \% \pm 5 \% \text{ HR}$ , l'adsorption d'eau entraîne une augmentation du taux d'agglomération de  $10 \% \pm 2 \%$  et une diminution de la fluidité de  $2 \text{ s} \pm 0,5 \text{ s}$  ( $16 \text{ s/50 g} \pm 0,5 \text{ s}$ ).

Optimisation : L'humidité de l'environnement de traitement est contrôlée à  $40 \%-50 \% \pm 5 \% \text{ HR}$ , et la poudre est séchée jusqu'à une teneur en humidité de  $< 0,1 \% \pm 0,01 \%$  (méthode Karl Fischer, GB/T 6283-2008).

### **Procédé de granulation :**

Français La granulation par séchage par atomisation (particules  $50 \mu\text{m} \pm 0,1 \mu\text{m}$ , sphéricité  $> 90 \% \pm 2 \%$ ) a augmenté la masse volumique tassée de  $10 \% \pm 2 \%$  ( $6,0 \text{ g/cm}^3 \pm 0,1 \text{ g/cm}^3$ ) et la fluidité de  $5 \% \pm 1 \%$  ( $13 \text{ secondes/50 g} \pm 0,5 \text{ secondes}$ ). La poudre non granulée (taille initiale des particules  $< 1 \mu\text{m} \pm 0,01 \mu\text{m}$ ) était fortement agglomérée et la masse volumique tassée n'était que de  $5,0 \text{ g/cm}^3 \pm 0,1 \text{ g/cm}^3$ .

Optimisation : Utiliser un sécheur par atomisation centrifuge (vitesse de rotation  $10\ 000-15\ 000 \text{ tr/min} \pm 50 \text{ tr/min}$ ), granulométrie  $50-80 \mu\text{m} \pm 0,1 \mu\text{m}$ , ajouter  $2 \% \pm 0,1 \%$  de liant PVA.

Exemple : Une poudre contenant  $10 \% \pm 1 \%$  de Co, une taille de particule Fisher de  $1 \mu\text{m} \pm 0,01 \mu\text{m}$ , des particules séchées par atomisation ( $50 \mu\text{m} \pm 0,1 \mu\text{m}$ ), une masse volumique après tassement de  $6,0 \text{ g/cm}^3 \pm 0,1 \text{ g/cm}^3$ , une fluidité de  $13 \text{ secondes/50 g} \pm 0,5 \text{ secondes}$ , une masse volumique après pressage  $> 99,5 \% \pm 0,1 \%$ , transformée en un trépan minier d'une durée de vie de  $> 1\ 200 \text{ m} \pm 100 \text{ m}$ .

### **Demande d'ingénierie**

#### **Couteaux d'aviation :**

Densité de taraudage  $5,8 \text{ g/cm}^3 \pm 0,1 \text{ g/cm}^3$ , fluidité  $13 \text{ secondes/50 g} \pm 0,5 \text{ secondes}$ , écart de taille du corps vert pressé  $< 0,01 \text{ mm} \pm 0,002 \text{ mm}$ , dureté après frittage HV  $2200 \pm 30$ , durée de vie  $> 12 \text{ heures} \pm 1 \text{ heure}$ , adapté au traitement des matériaux aéronautiques (alliage Ti-6Al-4V,  $1000^\circ\text{C} \pm 10^\circ\text{C}$ ).

#### **Forage minier :**

Densité de taraudage  $6,0 \text{ g/cm}^3 \pm 0,1 \text{ g/cm}^3$ , fluidité  $13 \text{ secondes/50 g} \pm 0,5 \text{ secondes}$ , densité frittée  $> 99,5 \% \pm 0,1 \%$ , résistance à la flexion  $> 4\ 200 \text{ MPa} \pm 100 \text{ MPa}$ , durée de vie  $> 1\ 200 \text{ m} \pm 100 \text{ m}$ , adapté au forage de roches dures (résistance à la compression  $> 200 \text{ MPa} \pm 10 \text{ MPa}$ ).

#### **Matrice de frappe à froid :**

Densité de taraudage  $6,2 \text{ g/cm}^3 \pm 0,1 \text{ g/cm}^3$ , fluidité  $14 \text{ s/50 g} \pm 0,5 \text{ s}$ , déformation après pressage  $< 0,01 \text{ mm} \pm 0,002 \text{ mm}$ , durée de vie du moule  $> 10^6 \text{ fois} \pm 10^5 \text{ fois}$ , adapté à la frappe à froid de haute

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

précision.

### Tests et contrôle qualité

Masse volumique apparente : Selon la norme ASTM B212, chaque lot est testé 3 fois et l'écart de valeur moyenne est  $< 2 \% \pm 0,5 \%$ .

Densité de taraudage : Selon la norme ASTM B527, enregistrer les paramètres de vibration (fréquence  $50 \text{ Hz} \pm 1 \text{ Hz}$ , amplitude  $1 \text{ mm} \pm 0,1 \text{ mm}$ ), écart  $< 2 \% \pm 0,5 \%$ .

Fluidité : basée sur la norme ASTM B213, étalonnage de l'ouverture de l'entonnoir ( $5 \text{ mm} \pm 0,1 \text{ mm}$ ), humidité de l'environnement de test  $< 50 \% \pm 5 \% \text{ HR}$ , écart  $< 1 \text{ seconde} \pm 0,2 \text{ seconde}$ .

Surveillance en ligne : utilisez un densimètre et un débitmètre automatiques pour enregistrer les données de lot en temps réel et les archiver pendant  $1 \text{ an} \pm 0,1 \text{ an}$ .

Français La masse volumique apparente ( $4,0\text{-}5,0 \text{ g/cm}^3$ ), la masse volumique après tassement ( $5,0\text{-}6,2 \text{ g/cm}^3$ ) et la fluidité (13-16 secondes/50 g) de la poudre de carbure de tungstène sont des paramètres clés pour la préparation du carbure cémenté. Les performances sont significativement affectées par la taille des particules ( $0,5\text{-}5 \mu\text{m}$ ), la morphologie (sphéricité  $> 95 \%$ ), la teneur en Co ( $8 \%\text{-}12 \%$ ), l'humidité ( $< 50 \% \text{ HR}$ ) et le procédé de granulation (particules  $50 \mu\text{m}$ ). En optimisant la taille des particules, la morphologie et les paramètres du procédé, une masse volumique après tassement de  $6,0 \text{ g/cm}^3$  et une fluidité de 13 secondes/50 g peuvent être obtenues, répondant aux exigences de haute performance des outils aéronautiques (durée de vie  $> 12 \text{ heures}$ ), des forets miniers (durée de vie  $> 1200 \text{ m}$ ) et des matrices de frappe à froid (déformation  $< 0,01 \text{ mm}$ ).

### 4.5 Résumé et perspectives

La sélection des matières premières et la préparation de la poudre de carbure cémenté sont les maillons clés de l'optimisation des performances. Français Ce chapitre explique la relation entre les paramètres du procédé et les performances en analysant la synthèse de poudre de carbure de tungstène ( $1450\text{ }1600^\circ\text{C} \pm 10^\circ\text{C}$ , granulométrie  $0,110\mu\text{m} \pm 0,01\mu\text{m}$ , carbone libre  $< 0,1\% \pm 0,01\%$ ), phase de liaison et additifs (pureté Co/Ni  $> 99,8\% \pm 0,01\%$ , VC/ Cr<sub>3</sub>C<sub>2</sub>  $< 1 \% \pm 0,01\%$ ), prétraitement de la poudre (broyage à billes 10:1  $\pm 0,5$ , débit de séchage par atomisation  $100 \text{ L/h} \pm 10 \text{ L/h}$ ) et caractérisation de la poudre (FSSS  $0,250\mu\text{m} \pm 0,01\mu\text{m}$ , masse volumique tassée  $4,06,2 \text{ g/cm}^3 \pm 0,1 \text{ g/cm}^3$ , fluidité  $1316 \text{ secondes}/50\text{g} \pm 0,5 \text{ secondes}$ ) :

### Poudre de WC

La taille des particules submicroniques ( $< 0,5 \mu\text{m} \pm 0,01 \mu\text{m}$ ) et la haute pureté (carbone libre  $< 0,08 \% \pm 0,01 \%$ ) augmentent la dureté ( $\text{HV} > 2300 \pm 30$ ) pour les outils d'aviation (durée de vie  $> 15\text{h} \pm 1\text{h}$ ).

### Phase de liaison

Le Co ( $10 \% \pm 1 \%$ ) assure la ténacité ( $K_{1c} 1520 \text{ MPa} \cdot \text{m}^{1/2} \pm 0,5$ ), et le Ni ( $12 \% \pm 1 \%$ ) améliore la résistance à la corrosion ( $< 0,01 \text{ mm/an} \pm 0,002 \text{ mm/an}$ ), et est utilisé pour les vannes en eaux profondes (durée de vie  $> 5 \text{ ans} \pm 0,5 \text{ an}$ ).

#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

### Un additif

Le VC ( $0,5 \% \pm 0,01 \%$ ) contrôle la taille des particules de WC ( $< 0,3 \mu\text{m} \pm 0,01 \mu\text{m}$ ), le  $\text{Cr}_3\text{C}_2$  ( $0,5 \% \pm 0,01 \%$ ) améliore la résistance ( $> 4\ 200 \text{ MPa} \pm 100 \text{ MPa}$ ) et est utilisé pour les forets PCB ( $> 10^5$  trous  $\pm 10^4$  trous).

### Prétraitement

Le broyage humide ( $12\text{h} \pm 0,1\text{h}$ ) et le séchage par atomisation ( $250^\circ\text{C} \pm 5^\circ\text{C}$ ) assurent l'uniformité (écart  $< 2\% \pm 0,5\%$ ) et la coulabilité ( $13 \text{ s}/50\text{g} \pm 0,5\text{s}$ ) pour une utilisation dans les forets miniers (densité  $> 99,5\% \pm 0,1\%$ ).

### Caractérisation

La FSSS ( $0,35 \mu\text{m} \pm 0,01 \mu\text{m}$ ) et la densité de tassement ( $5,86,2 \text{ g}/\text{cm}^3 \pm 0,1 \text{ g}/\text{cm}^3$ ) prédisent la qualité du frittage avec un écart de dureté réduit ( $< \pm 30 \text{ HV}$ ).

### Les stratégies d'optimisation comprennent

Rapport E:C précis ( $1:1,01 \pm 0,01$ ), atmosphère  $\text{H}_2$  ( $\text{O}_2 < 10 \text{ ppm} \pm 1 \text{ ppm}$ ), Co fin ( $< 1 \mu\text{m} \pm 0,01 \mu\text{m}$ ), ajout de VC ( $0,3\% \pm 0,5\% \pm 0,01\%$ ), broyage humide ( $10:1 \pm 0,5$ ,  $12\text{h} \pm 0,1\text{h}$ ) et séchage par atomisation (teneur en solides de  $60\% \pm 1\%$ ).

Par exemple, une poudre contenant  $0,3 \mu\text{m} \pm 0,01 \mu\text{m}$  de WC,  $10 \% \pm 1 \%$  de Co et  $0,5 \% \pm 0,01 \%$  de VC (FSSS  $0,3 \mu\text{m} \pm 0,01 \mu\text{m}$ , masse volumique tassée  $6,0 \text{ g}/\text{cm}^3 \pm 0,1 \text{ g}/\text{cm}^3$ , fluidité  $13 \text{ secondes}/50 \text{ g} \pm 0,5 \text{ secondes}$ ) est utilisée pour les outils d'aviation, avec une dureté HV  $2300 \pm 30$ , une quantité d'usure  $< 0,08 \text{ mm} \pm 0,02 \text{ mm}$  et une durée de vie  $> 15 \text{ heures} \pm 1 \text{ heure}$ ; La poudre contenant  $1 \mu\text{m} \pm 0,01 \mu\text{m}$  de WC,  $12 \% \pm 1 \%$  de Ni et  $0,5 \% \pm 0,01 \%$  de  $\text{Cr}_3 \text{C}_2$  est utilisée pour les vannes en eaux profondes, avec une profondeur de corrosion  $< 3 \mu\text{m} \pm 0,5 \mu\text{m}$  et une durée de vie  $> 5 \text{ ans} \pm 0,5 \text{ an}$ .

Français Les futures orientations de recherche comprennent la production à grande échelle de poudre de nano WC ( $< 0,1 \mu\text{m} \pm 0,01 \mu\text{m}$ ) (rendement  $> 5 \text{ t}/\text{lot} \pm 0,5 \text{ t}$ ), la phase de liaison verte (à base de Fe, coût  $< 1\ 000 \text{ \$/t} \pm 100 \text{ USD}$ ), de nouveaux inhibiteurs (tels que TaC,  $< 0,5 \% \pm 0,01 \%$ ) et la caractérisation intelligente (prédiction IA de FSSS, erreur  $< 1 \% \pm 0,2 \%$ ) pour répondre aux besoins de l'aviation (vitesse de coupe  $> 500 \text{ m}/\text{min} \pm 10 \text{ m}/\text{min}$ ), des grands fonds marins ( $> 10\ 000 \text{ m}$ ) et des nouvelles énergies (durée de vie de l'électrolyseur  $> 10^4 \text{ heures} \pm 10^3 \text{ heures}$ ). Ce chapitre fournit une base de processus pour le formage et le frittage au chapitre 5 en corrélant la contribution de la phase WCCo avec les performances au chapitre 3.

#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

**Annexe : Tableau de référence pour la sélection des produits en carbure cémenté et de la poudre de carbure de tungstène**

produit taper	produit Exemple	Exigences de performance	Caractéristiques de la poudre WC	Paramètres de sélection de la poudre WC	Scénarios applicables	illustrer
Coupe lame	Plaquettes de tournage, plaquettes de fraisage, plaquettes de rainurage	Dureté élevée (HRA 8993 ±0,5), excellente résistance à l'usure (usure en dépouille VB < 0,3 mm), résistance à l'écaillage (profondeur d'écaillage < 0,15 mm), rugosité de surface Ra < 0,8 µm	Grain fin (0,51,5 µm ±0,1 µm), haute pureté (>99,95 % ±0,01 %), faible teneur en oxygène (<0,1 % ±0,01 %), distribution uniforme des particules (D50 ±0,1 µm)	Taille des particules : 0,51,5 µm ±0,1 µm, pureté : >99,95 % ±0,01 %, teneur en carbone : 6,13 % 6,18 % ±0,01 %, teneur en Co : 6 % 12 % ±0,5 %, additifs : TiC / TaC ( 0 % 2 % ±0,1 %)	de l'acier, de l'acier inoxydable et de la fonte, vitesse de coupe 100400 m/min ±10 m/min	La poudre WC à grains fins assure une dureté et une résistance à l'usure élevées, TiC / TaC améliore les performances à haute température et la teneur en Co équilibre la ténacité et la dureté ; convient aux inserts de type ISO P/M/K.
Outil global	Forets, fraises, alésoirs	Résistance élevée à la flexion (2000-3000 MPa ±100 MPa), excellente ténacité (ténacité à la rupture 812 MPa·m <sup>1/2</sup> ± 0,5), résistance aux chocs (ténacité aux chocs > 10 J/cm <sup>2</sup> ± 1 J/cm <sup>2</sup> )	Grain moyen-fin (1,02,0 µm ±0,1 µm), haute pureté (> 99,9 % ± 0,01 %), teneur en oxygène modérée (< 0,15 % ± 0,01 %), composition chimique stable	des particules : 1,02,0 µm ±0,1 µm, pureté : >99,9 % ±0,01 %, teneur en carbone : 6,10 % 6,15 % ±0,01 %, teneur en Co : 8 % 15 % ±0,5 %, additifs : VC/ Cr <sub>3</sub> C <sub>2</sub> (0,1 % 0,5 % ±0,05 %)	Acier moulé, traitement des alliages d'aluminium, profondeur de perçage/fraisage < 20 mm ± 1 mm	Le WC à grain moyen-fin améliore la ténacité, le VC/ Cr <sub>3</sub> C <sub>2</sub> contrôle la croissance des grains et assure la résistance globale de l'outil ; adapté aux environnements de traitement à forte charge.
Filières de tréfilage	Filière de tréfilage, filière d'extrusion	Très haute résistance à l'usure (taux d'usure < 0,01 mm <sup>3</sup> / h ± 0,001 mm <sup>3</sup> / h), état de surface élevé (Ra < 0,05 µm), résistance à la corrosion (résistance aux acides et aux alcalis pH 310)	Grain ultrafin (0,20,8 µm ±0,1 µm), pureté élevée (> 99,98 % ± 0,01 %), teneur en oxygène extrêmement faible (< 0,05 % ± 0,01 %), uniformité élevée	Taille des particules : 0,20,8 µm ±0,1 µm, pureté : >99,98 % ±0,01 %, teneur en carbone : 6,15 % 6,20 % ±0,01 %, teneur en Co : 3 % 6 % ±0,5 %, additifs : pas ou une petite quantité de TaC (<0,5 % ±0,05 %)	Tréfilage de fils de cuivre et d'acier, diamètre du fil 0,15 mm ± 0,01 mm	Le WC à grain ultrafin offre une finition miroir et une résistance à l'usure, la faible teneur en Co améliore la dureté ; la pureté de la poudre doit être strictement contrôlée pour éviter les impuretés.
matrice d'estampage	Matrice de frappe à froid, matrice de poinçonnage	Haute résistance à la compression (> 4000 MPa ± 100 MPa), résistance aux chocs (nombre d'impacts > 10 <sup>6</sup> ± 10 <sup>4</sup> ), résistance à la fatigue	Grain moyen grossier (2,04,0 µm ±0,2 µm), haute pureté (>99,9% ±0,01%), teneur en oxygène modérée (<0,2% ±0,01%), haute stabilité	Taille des particules : 2,04,0 µm ±0,2 µm, pureté : >99,9 % ± 0,01 %, teneur en carbone : 6,08 % 6,13 % ±0,01 %, teneur en Co : 10 % 20 % ±0,5 %, additifs : Cr <sub>3</sub> C <sub>2</sub>	Boulons, emboutissage de tôle, épaisseur < 10 mm ± 0,1 mm	Le WC à grains moyens-grossiers améliore la résistance aux chocs, la teneur élevée en Co améliore la ténacité et le Cr <sub>3</sub> C <sub>2</sub>

**COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT**

produit taper	produit Exemple	Exigences de performance	Caractéristiques de la poudre WC	Paramètres de sélection de la poudre WC	Scénarios applicables	illustrer
		(résistance à la fatigue > 1000 MPa ± 50 MPa)		(0,2 % 1 % ± 0,05 %)		inhibe la croissance des grains ; convient aux moules à fortes contraintes.
Pièces résistantes à l'usure	Buse, bague d'étanchéité, marteau supérieur	Haute résistance à l'usure (perte par usure < 0,005 mm <sup>3</sup> / N · m ± 0,001 mm <sup>3</sup> / N · m ), résistance à la corrosion (durée de vie > 5000 h ± 100 h), stabilité thermique (< 800 °C ± 10 °C)	Gros grain (3,06,0 μm ± 0,5 μm ), pureté (>99,8 % ± 0,01 %), teneur élevée en oxygène (<0,3 % ± 0,01 %), stabilité chimique élevée	Taille des particules : 3,06,0 μm ± 0,5 μm , pureté : >99,8 % ± 0,01 %, teneur en carbone : 6,05 % 6,10 % ± 0,01 %, teneur en Co : 12 % 25 % ± 0,5 %, additifs : aucune ou petite quantité de Ni (<2 % ± 0,1 %)	Sablage, exploitation minière, scellement, pression de travail < 50 MPa ± 1 MPa	Le WC à gros grains améliore la résistance à l'usure et la ténacité, et une teneur élevée en Co ou Ni améliore la résistance à la corrosion ; convient aux pièces résistantes à l'usure dans des conditions de travail extrêmes.
Outils miniers	Pics, forets à roche	Très haute résistance aux chocs (ténacité aux chocs > 15 J/cm <sup>2</sup> ± 1 J/cm <sup>2</sup> ), résistance à l'usure (taux d'usure < 0,02 mm <sup>3</sup> / h ± 0,002 mm <sup>3</sup> / h), résistance à la fatigue	Grain ultra-grossier (6,010,0 μm ± 1,0 μm ), pureté (>99,7 % ± 0,01 %), teneur élevée en oxygène (<0,4 % ± 0,01%), ténacité élevée	Taille des particules : 6,010,0 μm ± 1,0 μm , pureté : >99,7 % ± 0,01 %, teneur en carbone : 6,00 % 6,10 % ± 0,01 %, teneur en Co : 15 % 30 % ± 1 %, additifs : pas ou une petite quantité d'alliage CoNi (<5 % ± 0,2 %)	Extraction de charbon, extraction de roche dure, fréquence d'impact < 100 Hz ± 5 Hz	Le WC à grains ultra-gros offre une ténacité élevée et une teneur élevée en Co améliore la résistance aux chocs ; il convient aux environnements miniers à forte charge et la teneur en oxygène doit être contrôlée pour éviter la fragilisation.
Pièces de précision	Micro-outils, noyaux de valve	Haute précision (tolérance dimensionnelle ± 0,005 mm), excellente finition de surface (Ra < 0,02 μm ), dureté élevée (HRA 9294 ± 0,5)	Nanocristaux (0,10,4 μm ± 0,05 μm ), pureté ultra élevée (> 99,99 % ± 0,01 %), teneur en oxygène extrêmement faible (< 0,03 % ± 0,01 %) et uniformité extrêmement élevée	Taille des particules : 0,10,4 μm ± 0,05 μm , pureté : >99,99 % ± 0,01 %, teneur en carbone : 6,18 % 6,22 % ± 0,01 %, teneur en Co : 2 % 5 % ± 0,3 %, additifs : VC (0,05 % 0,2 % ± 0,02 %)	Traitement de pièces électroniques, contrôle des fluides, taille < 10 mm ± 0,1 mm	Le WC nanocristallin assure une dureté et une douceur ultra élevées, un faible contrôle du Co et du VC sur la croissance des grains ; une poudre de haute pureté est nécessaire pour éviter les défauts.

**COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT**

**Tableau de référence pour la sélection des produits en carbure cimenté et des procédés de production**

produit taper	Exemples de produits	Exigences de performance	Processus de pressage recommandé	de Recommandé Artisanat de nœuds	Paramètres du processus	Scénarios applicables	illustrer
<b>Plaquettes de coupe</b>	Plaquettes de tournage, plaquettes de fraisage, plaquettes de rainurage	Dureté élevée (HRA 8993 ± 0,5), résistance à l'usure (usure en dépouille VB < 0,3 mm), résistance à l'écaillage (profondeur d'écaillage < 0,15 mm), rugosité de surface Ra < 0,8 µm	Moulage par compression bidirectionnelle, pressage isostatique à froid	Frittage sous vide, frittage à basse pression	Pressage : pression 100250 MPa ±10 MPa, temps 1040 s ±1 s, densité du corps vert 60 % 75 % ±2 % (moulage bidirectionnel) ; pression 100300 MPa ±10 MPa, pression de maintien 15 min ±10 s, densité du corps vert 70 % 85 % ±1 % (CIP) Frittage : température 1350 1500 °C ±10 °C, température de maintien 14 h ±5 min, degré de vide 0,01 0,1 Pa ±0,01 Pa, densité 98 % 99,5 % ±0,5 % (vide) ; pression 110 MPa ±0,05 MPa, densité 98,5 % 99,5 % ±0,3 % (basse pression)	de l'acier, de l'acier inoxydable et de la fonte, vitesse de coupe 100400 m/min ±10 m/min	à l'usure ; convient aux lames ISO P/M/K, granulométrie 0,51,5 µm ±0,1 µm .
<b>Outil global</b>	Forets, fraises, alésoirs	Haute résistance à la flexion (2000-3000 MPa ±100 MPa), ténacité (ténacité à la rupture 812 MPa·m <sup>1/2</sup> ± 0,5), résistance aux chocs (ténacité aux chocs > 10 J/cm <sup>2</sup> ± 1 J/cm <sup>2</sup> )	Moulage par extrusion, pressage isostatique froid	Pressage isostatique à chaud (HIP), frittage sous vide	Pressage : pression d'extrusion 20100 MPa ±5 MPa, vitesse 0,11 m/min ±0,01 m/min, densité de la billette 50 % 65 % ±2 % (extrusion) ; pression 100300 MPa ±10 MPa, pression de maintien 15 min ±10 s, densité de la billette 70 % 85 % ±1 % (CIP) < Frittage : température 1300 1450 °C ±10 °C, pression 100200 MPa ±0,1 MPa, température de maintien 13 h ±5 min, densité 99,8 % 100 % ±0,2 % (HIP) ; température ussel13501500°C ±10°C, température de maintien 14 h ±5 min, densité 98%99,5% ±0,5% (vide)	Acier moulé, traitement des alliages d'aluminium, profondeur de perçage/fraisage < 20 mm ± 1 mm	Le moulage par extrusion convient aux barres, le CIP convient aux formes complexes ; le HIP améliore la résistance, le frittage sous vide a un faible coût ; la teneur en Co est de 8 % 15 % ± 0,5 %.
<b>Filières de tréfilage</b>	Filière de tréfilage, filière d'extrusion	Très haute résistance à l'usure (taux d'usure < 0,01	Moulage par injection de poudre, pressage isostatique à vide	Frittage par micro-ondes, frittage sous vide	Pressage : pression d'injection 50150 MPa ±5 MPa, température 150200°C ±5°C, retrait de la billette 15%20% ±1% (PIM) ;	Tréfilage de fils de cuivre et d'acier, diamètre du fil 0,15 mm ±	Le PIM convient aux moules de précision, le CIP assure

**COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT**

produit taper	Exemples de produits	Exigences de performance	Processus de pressage recommandé	de Recommandé Artisanat de nœuds	Paramètres du processus	Scénarios applicables	illustrer
		mm <sup>3</sup> /h ± 0,001 mm <sup>3</sup> /h), état de surface (Ra < 0,05 μ m ) , résistance à la corrosion ( résistance aux acides et aux alcalis pH 310)	froid		pression 100300 MPa ±10 MPa, pression de maintien 15 min ±10 s, densité de la billette 70%85% ±1% (CIP)< br >Frittage : température 13001450°C ±10°C, durée 1060 min ±1 min, densité 97%99% ±0,5% (micro-ondes) ; température 13501500°C ±10°C, température de maintien 14 h ±5 min, densité 98%99,5% ±0,5% (vide)	0,01 mm	l'uniformité ; le frittage par micro-ondes est efficace, le frittage sous vide assure la douceur ; poudre WC ultra-fine 0,20,8 μ m ± 0,1 μ m .
matrice d'estampage	Matrice de frappe à froid, matrice de poinçonnage	Haute résistance à la compression (> 4000 MPa ± 100 MPa), résistance aux chocs (nombre d'impacts > 10 <sup>6</sup> ± 10 <sup>4</sup> ) , résistance à la fatigue > 1000 MPa ± 50 MPa)	Moulage par compression unidirectionnelle, pressage isostatique froid	Pressage isostatique à chaud (HIP), frittage sous protection gazeuse	Pressage : pression 50200 MPa ±10 MPa, temps 530 s ±1 s, densité du corps vert 50 % 70 % ±2 % (unidirectionnel) ; pression 100300 MPa ±10 MPa, pression de maintien 15 min ±10 s, densité du corps vert 70 % 85 % ±1 % (CIP) Frittage : température 1300 1450 °C ±10 °C, pression 100200 MPa ±0,1 MPa, température de maintien 13 h ±5 min, densité 99,8 % 100 % ±0,2 % (HIP) ; température 1350 1480 °C ±10 °C, température de maintien 15 h ±5 min, densité 97 % 99 % ±0,5 % (gaz)	Boulons, emboutissage de tôle, épaisseur < 10 mm ± 0,1 mm	Le moulage unidirectionnel a un faible coût, le CIP convient aux moules complexes ; le HIP améliore la résistance, la protection contre les gaz convient aux grands moules ; WC à grain moyen-grossier 2,04,0 μ m ± 0,2 μ m .
Pièces résistantes à l'usure	Buse, bague d'étanchéité, marteau supérieur	Haute résistance à l'usure (perte par usure < 0,005 mm <sup>3</sup> / N · m ± 0,001 mm <sup>3</sup> / N · m ) , résistance à la corrosion (durée de vie > 5000 h ± 100 h), stabilité thermique (<	Profilage par rouleaux, pressage isostatique sacs secs	Frittage à basse pression, frittage sous gaz protecteur	Pressage : pression des rouleaux 50150 MPa ±10 MPa, vitesse des rouleaux 0,55 tr/min ±0,1 tr/min, épaisseur de la billette 110 mm ±0,1 mm (laminage) ; pression 150400 MPa ±10 MPa, temps 30120 s ±5 s, densité de la billette 70 % 80 % ±1 % (sac sec) < br > Frittage : température 13501450°C ±10°C, pression 110 MPa ±0,05 MPa, isolation 13 h ±5	Sablage, exploitation minière, scellement, pression < 50 MPa ± 1 MPa	Le profilage convient aux plaques minces, le pressage isostatique en sac sec est efficace ; le frittage à basse pression équilibre les performances, la

**COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT**

produit taper	Exemples de produits	Exigences de performance	Processus de pressage recommandé	Recommandé Artisanat de nœuds	Paramètres du processus	Scénarios applicables	illustrer
		800 °C ± 10 °C)			min, densité 98,5 % 99,5 % ±0,3 % (basse pression) ; température 1350/1480°C ±10°C, isolation 15 h ±5 min, densité 97 % 99 % ±0,5 % (gaz)		protection contre les gaz convient aux grandes pièces ; WC à gros grains 3,06,0 μm ±0,5 μm .
<b>Outils miniers</b>	Pics, forets à roche	Très haute résistance aux chocs (ténacité aux chocs > 15 J/cm² ± 1 J/cm² ), résistance à l'usure (taux d'usure < 0,02 mm³ / h ± 0,002 mm³ /h), résistance à la fatigue	Moulage par compression unidirectionnelle, moulage par extrusion	Frittage sous gaz protecteur, frittage sous vide	Pressage : pression 50200 MPa ±10 MPa, temps 530 s ±1 s, densité de la billette 50 % 70 % ±2 % (unidirectionnel) ; pression d'extrusion 20100 MPa ±5 MPa, vitesse 0,11 m/min ±0,01 m/min, densité de la billette 50 % 65 % ±2 % (extrusion) Frittage : température 1350 1480 °C ±10 °C, isolation 15 h ±5 min, densité 97 % 99 % ±0,5 % (gaz) ; température 1350 1500 °C ±10 °C, isolation 14 h ±5 min, densité 98 % 99,5 % ±0,5 % (vide)	Extraction de charbon, extraction de roche dure, fréquence d'impact < 100 Hz ± 5 Hz	Le moulage unidirectionnel a un faible coût et convient aux longues bandes ; la protection contre les gaz convient aux grandes pièces et le frittage sous vide améliore les performances ; WC à grains ultra-grossiers 6,010,0 μm ± 1,0 μm .
<b>Pièces de précision</b>	Micro-outils, noyaux de valve	Haute précision (tolérance ±0,005 mm), état de surface (Ra <0,02 μ m ) , dureté élevée (HRA 9294 ±0,5)	Moulage par injection de poudre, pressage isostatique en sac sec	Frittage par micro-ondes, frittage par plasma d'étincelles (SPS)	Pressage : pression d'injection 50150 MPa ±5 MPa, température 150200°C ±5°C, retrait de la billette 15%20% ±1% (PIM) ; pression 150400 MPa ±10 MPa, temps 30120 s ±5 s, densité de la billette 70%80% ±1% (sac sec) >Frittage : température 1300/1450°C ±10°C, temps 1060 min ±1 min, densité 97%99% ±0,5% (micro-ondes) ; température 1200/1400°C ±10°C, pression 30100 MPa ±0,1 MPa, temps 520 min ±30 s, densité	Traitement de pièces électroniques, contrôle des fluides, taille < 10 mm ± 0,1 mm	Le pressage isostatique PIM et Dry Bag convient aux formes micro-complexes ; les micro-ondes et le SPS sont rapides et de haute précision ; WC nanocristallin 0,10,4 μm ± 0,05 μm .

**COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT**

produit taper	Exemples de produits	Exigences de performance	Processus de pressage recommandé	Recommandé Artisanat de nœuds	Paramètres du processus	Scénarios applicables	illustrer
					98,5%±0,5% (SPS)		
<b>Outils de roulage</b>	Rouleau, rouleau presseur	Haute résistance à l'usure (perte par usure < 0,01 mm <sup>3</sup> / N · m ± 0,001 mm <sup>3</sup> / N · m ), résistance à la fatigue (durée de vie en fatigue > 10 <sup>7</sup> cycles ± 10 <sup>5</sup> ), stabilité thermique (< 900 °C ± 10 °C)	Pressage isostatique à froid, moulage par compression unidirectionnelle	Pressage isostatique à chaud (HIP), frittage à basse pression	Pressage : pression 100300 MPa ±10 MPa, pression de maintien 15 min ±10 s, densité du corps vert 70 % 85 % ±1 % (CIP) ; pression 50200 MPa ±10 MPa, temps 530 s ±1 s, densité du corps vert 50 % 70 % ±2 % (unidirectionnel) < br >Frittage : température 1300 1450 °C ±10 °C, pression 100200 MPa ±0,1 MPa, pression de maintien 13 h ±5 min, densité 99,8 % 100 % ±0,2 % (HIP) ; température 1350 1450 °C ±10 °C, pression 110 MPa ±0,05 MPa, pression de maintien 13 h ±5 min, densité 98,5% 99,5% ±0,3% (basse pression)	Laminage de tôles d'acier et de profilés en aluminium, force de pression <1000 kN ±10 kN	du moulage unidirectionnel est faible ; le HIP améliore la résistance à l'usure et le frittage à basse pression équilibre le coût ; WC à gros grains 3,06,0 μm ±0,5 μm , Co 10% 20% ±0,5%.
<b>Doubleur résistante à l'usure</b>	Revêtement de concasseur, revêtement de moulin	Haute résistance à l'usure (taux d'usure < 0,015 mm <sup>3</sup> / h ± 0,002 mm <sup>3</sup> / h), résistance aux chocs (ténacité aux chocs > 12 J/cm <sup>2</sup> ± 1 J/cm <sup>2</sup> ), résistance à la corrosion (durée de vie > 4000 h ± 100 h)	Profilage par rouleaux, moulage par compression unidirectionnelle	Frittage sous protection gazeuse, frittage à basse pression	Pressage : pression des rouleaux 50150 MPa ±10 MPa, vitesse des rouleaux 0,55 tr/min ±0,1 tr/min, épaisseur de la billette 110 mm ±0,1 mm (laminage) ; pression 50200 MPa ±10 MPa, temps 530 s ±1 s, densité de la billette 50 % 70 % ±2 % (unidirectionnel) Frittage : température 1350 1480 °C ±10 °C, isolation 15 h ±5 min, densité 97 % 99 % ±0,5 % (gaz) ; température 1350 1450 °C ±10 °C, pression 110 MPa ±0,05 MPa, isolation 13 h ±5 min, densité 98,5 % 99,5 % ±0,3 % (basse pression)	Exploitation minière, concassage de matériaux, taux d'usure < 0,1 mm/mois ± 0,01 mm	Le profilage convient aux plaques minces et le moulage unidirectionnel est efficace ; la protection par gaz convient aux grandes plaques de revêtement et le frittage à basse pression améliore les performances ; WC à grains moyens-grossiers 2,04,0 μm ± 0,2 μm .
<b>Composants de roulement</b>	Manchons de roulement,	Haute résistance à l'usure (perte par	Moulage par injection	Frittage sous vide, frittage	Pressage : pression d'injection 50150 MPa ±5 MPa, température	Machines à grande vitesse,	Le PIM convient aux formes

**COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT**

produit taper	Exemples de produits	Exigences de performance	Processus de pressage recommandé	Recommandé Artisanat de nœuds	Paramètres du processus	Scénarios applicables	illustrer
	billes	usure < 0,003 mm <sup>3</sup> / N · m ± 0,001 mm <sup>3</sup> / N · m), haute précision (tolérance ± 0,01 mm), résistance à la fatigue (durée de vie > 10 <sup>8</sup> cycles ± 10 <sup>6</sup> )	poudre, pressage isostatique à froid	par plasma à d'étincelles (SPS)	150200°C ±5°C, retrait de la billette 15%20% ±1% (PIM); pression 100300 MPa ±10 MPa, pression de maintien 15 min ±10 s, densité de la billette 70%85% ±1% (CIP)< br >Frittage : température 13501500°C ±10°C, pression de maintien 14 h ±5 min, densité 98%99,5% ±0,5% (vide); température 12001400°C ±10°C, pression 30100 MPa ±0,1 MPa, temps 520 min ±30 s, densité 98%99,5% ±0,5% (SPS)	roulements automobiles, vitesse < 10 <sup>4</sup> tr/min ± 100 tr/min	complexes, le CIP assure l'uniformité; le frittage sous vide est universel, le SPS améliore la précision; WC à grains fins 0,51,5 μm ±0,1 μm.
<b>Outils de pulvérisation</b>	Buse de pulvérisation, buse de sablage	Très haute résistance à l'usure (taux d'usure < 0,005 mm <sup>3</sup> / h ± 0,001 mm <sup>3</sup> / h), résistance à la corrosion (résistance aux acides et aux bases pH 212), stabilité thermique (< 700°C ± 10°C)	Moulage par injection de poudre, pressage isostatique en sac sec	Frittage par micro-ondes, frittage à basse pression	Pressage : pression d'injection 50150 MPa ±5 MPa, température 150200°C ±5°C, retrait de la billette 15%20% ±1% (PIM); pression 150400 MPa ±10 MPa, temps 30120 s ±5 s, densité de la billette 70%80% ±1% (sac sec)< br >Frittage : température 13001450°C ±10°C, temps 1060 min ±1 min, densité 97%99% ±0,5% (micro-ondes); température 13501450°C ±10°C, pression 110 MPa ±0,05 MPa, isolation 13 h ±5 min, densité 98,5%99,5% ±0,3% (basse pression)	Sablage, pulvérisation de peinture, débit <100 L/min ±1 L/min	Le PIM convient aux buses de précision, le pressage isostatique en sac sec est efficace; le frittage par micro-ondes est rapide, le frittage à basse pression garantit les performances; WC ultrafin 0,20,8 μm ± 0,1 μm.
<b>Outils médicaux</b>	Forets dentaires, lames chirurgicales	Dureté élevée (HRA 9194 ±0,5), état de surface (Ra <0,01 μm), biocompatibilité (non toxique), haute précision (tolérance ±0,002 mm)	Moulage par injection de poudre, pressage isostatique en sac sec	Frittage par plasma à d'étincelles (SPS), frittage sous vide	Pressage : pression d'injection 50150 MPa ±5 MPa, température 150200°C ±5°C, retrait de la billette 15%20% ±1% (PIM); pression 150400 MPa ±10 MPa, temps 30120 s ±5 s, densité de la billette 70%80% ±1% (sac sec)< br >Frittage : température 12001400°C ±10°C, pression	Chirurgie dentaire, traitement orthopédique, taille < 5 mm ± 0,05 mm	Le pressage isostatique PIM et Dry Bag convient aux formes micro-complexes; le SPS a une haute précision et un frittage sous vide

**COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT**

produit taper	Exemples de produits	Exigences de performance	Processus de pressage recommandé	Recommandé Artisanat de nœuds	Paramètres du processus	Scénarios applicables	illustrer
					30100 MPa ±0,1 MPa, temps 520 min ±30 s, densité 98%99,5% ±0,5% (SPS) ; température 13501500°C ±10°C, isolation 14 h ±5 min, densité 98%99,5% ±0,5% (vide)		stable ; WC nanocristallin 0,10,4 μm ±0,05 μm, Co aussi basse que 2 % 5 % ±0,3 %.
<b>Composants énergétiques</b>	Dents de perçage, joints de soupapes	Haute résistance à l'usure (perte par usure < 0,008 mm <sup>3</sup> / N · m ± 0,001 mm <sup>3</sup> / N · m ) , résistance à la corrosion (résistance aux acides et aux alcalis pH 211), résistance aux hautes températures (< 1000 °C ± 10 °C)	Pressage isostatique en sac sec	Pressage isostatique à chaud (HIP), frittage à basse pression	Pressage : pression 100300 MPa ±10 MPa, pression de maintien 15 min ±10 s, densité du corps vert 70 % 85 % ±1 % (CIP) ; pression 150400 MPa ±10 MPa, temps 30120 s ±5 s, densité du corps vert 70 % 80 % ±1 % (sac sec) < br > Frittage : température 13001450°C ±10°C, pression 100200 MPa ±0,1 MPa, pression de maintien 13 h ±5 min, densité 99,8 % 100 % ±0,2 % (HIP) ; température 13501450°C ±10°C, pression 110 MPa ±0,05 MPa, pression de maintien 13 h ±5 min, densité 98,5%99,5% ±0,3% (basse pression)	Forage pétrolier, vannes de gaz naturel, pression <100 MPa ±1 MPa	Le pressage isostatique CIP et Dry Bag convient aux formes complexes ; le HIP améliore les performances à haute température et le frittage à basse pression a un coût modéré ; WC à gros grains 3,06,0 μm ±0,5 μm , ajout de Ni <2% ±0,1%.
<b>composants aérospatiaux</b>	Moules pour aubes de turbine, moules pour fixations	Haute résistance à la fatigue (durée de vie en fatigue > 10 <sup>8</sup> cycles ± 10 <sup>6</sup> ) , résistance aux hautes températures (< 900 °C ± 10 °C), haute précision (tolérance ± 0,01 mm)	Moulage par injection de poudre, pressage isostatique à froid	Frittage sous vide, pressage isostatique à chaud (HIP)	Pressage : pression d'injection 50150 MPa ±5 MPa, température 150200°C ±5°C, retrait de la billette 15%20% ±1% (PIM) ; pression 100300 MPa ±10 MPa, pression de maintien 15 min ±10 s, densité de la billette 70%85% ±1% (CIP) < br > Frittage : température 13501500°C ±10°C, température de maintien 14 h ±5 min, densité 98%99,5% ±0,5% (vide) ; température 13001450°C ±10°C, pression 100200 MPa ±0,1 MPa, température de maintien 13 h ±5 min, densité	Moteur d'avion, fabrication de fixations, taille < 50 mm ± 0,5 mm	Le PIM convient aux moules de précision et complexes, le CIP assure l'uniformité ; le frittage sous vide est universel, le HIP améliore la résistance à la fatigue ; WC à grains fins 0,51,5 μm ±0,1 μm .

**COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT**

produit taper	Exemples de produits	Exigences de performance	Processus de pressage recommandé	Recommandé de Artisanat de nœuds	Paramètres du processus	Scénarios applicables	illustrer
					99,8%100% ±0,2% (HIP)		
<b>Outils de fabrication électronique</b>	Moule à semi-conducteur, moule à grille de connexion	Haute précision (tolérance ±0,003 mm), état de surface (<math>Ra < 0,015 \mu m</math>), dureté élevée (HRA 9295 ±0,5)	Moulage par injection de poudre, pressage isostatique en sac sec	Frittage par plasma d'étincelles (SPS), frittage par micro-ondes	Pressage : pression d'injection 50150 MPa ±5 MPa, température 150200°C ±5°C, retrait de la billette 15%20% ±1% (PIM) ; pression 150400 MPa ±10 MPa, temps 30120 s ±5 s, densité de la billette 70%80% ±1% (sac sec) <math>F_{br} > F_{frittage}</math> ; température 12001400°C ±10°C, pression 30100 MPa ±0,1 MPa, temps 520 min ±30 s, densité 98%99,5% ±0,5% (SPS) ; température 13001450°C ±10°C, temps 1060 min ±1 min, densité 97%99% ±0,5% (micro-ondes)	Emballage de semi-conducteurs, fabrication de puces, taille <math>10 \text{ mm} \pm 0,1 \text{ mm}</math>	Le pressage isostatique PIM et Dry Bag convient aux micro-moules ; le frittage SPS et micro-ondes est de haute précision et rapide ; WC nanocristallin 0,10,4 μm ± 0,05 μm .
<b>Outils de construction</b>	Forets à béton, lames de coupe de briques	Haute résistance à l'usure (taux d'usure <math>< 0,02 \text{ mm}^3 / \text{h} \pm 0,002 \text{ mm}^3 / \text{h}</math>), résistance aux chocs (ténacité aux chocs > 14 J/cm <sup>2</sup> ) ± 1 J/cm <sup>2</sup> ), résistance à la corrosion (durée de vie > 3000 h ± 100 h)	Moulage par compression unidirectionnelle, moulage par extrusion	Frittage sous gaz protecteur, frittage sous vide	Pressage : pression 50200 MPa ±10 MPa, temps 530 s ±1 s, densité de la billette 50 % 70 % ±2 % (unidirectionnel) ; pression d'extrusion 20100 MPa ±5 MPa, vitesse 0,11 m/min ±0,01 m/min, densité de la billette 50 % 65 % ±2 % (extrusion) Frittage : température 1350 1480 °C ±10 °C, isolation 15 h ±5 min, densité 97 % 99 % ±0,5 % (gaz) ; température 1350 1500 °C ±10 °C, isolation 14 h ±5 min, densité 98 % 99,5 % ±0,5 % (vide)	Béton, traitement de la maçonnerie, profondeur de perçage <math>< 100 \text{ mm} \pm 1 \text{ mm}</math>	Le moulage unidirectionnel a un faible coût et l'extrusion convient aux longues bandes ; la protection par gaz convient aux grandes quantités et le frittage sous vide améliore les performances ; WC à grain moyen-grossier 2,04,0 μm ± 0,2 μm .

## Références

Exner, HE (1979). Nature physique et chimique des carbures cémentés. *International Metals Reviews* , 24(1), 149173. <https://doi.org/10.1179/imtr.1979.24.1.149>

Exner, HE (1979). Nature physique et chimique des carbures cémentés. *International Metals Reviews*, 24(1), 149173.

### 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)

- Upadhyaya, GS (1998). *Carbures de tungstène cémentés : production, propriétés et essais*. Éditions William Andrew.
- Fang, ZZ et Eso, OO (2014). Progrès dans le traitement du carbure cémenté. Dans V.K. Sarin (éd. ). *Matériaux durs complets (Vol. 1, pp . 167-190)*. Elsevier.
- Wang, H., et Fang, ZZ (2019). Propriétés thermiques et mécaniques des carbures cémentés dans des 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 .
- Prakash, LJ (2014). Métaux durs : structure, propriétés et performances. Dans V. K. Sarin (éd.), *Comprehensive hard materials* (vol. 1, p. 2954). Elsevier.
- Prakash, LJ (2014). Carbure cémenté : structure, propriétés et performances. Dans V. K. Sarin (éd.), *Comprehensive Hard Materials* (vol. 1, p. 2954). Éditions Elsevier.
- Luyckx, S., et Love, A. (2006). Relation entre la nuance et la microstructure des carbures cémentés. *Revue internationale des métaux réfractaires et des matériaux durs*, 24(12), 7582.
- Liu, Y., et Jiang, Y. (2018). Synthèse de poudres de WC ultrafines par traitement mécano-chimique. *Technologie des poudres* , 338, 623630.
- Sun, J., et Zhao, J. (2020). Effets des inhibiteurs de croissance des grains sur la microstructure des carbures cémentés. *Ceramics International* , 46(8), 1154311550.
- Sun, J., et Zhao, J. (2020). Effet d'un inhibiteur de croissance des grains sur la microstructure du carbure cémenté. *Revue internationale de la céramique*, 46(8), 1154311550.
- Zhang, H., et Li, X. (2022). Conductivité thermique des carbures cémentés : approches expérimentales et de modélisation. *Journal of Materials Research and Technology* , 18, 12341245 .
- Kim, S., et Lee, J. (2021). Résistance aux chocs thermiques des carbures cémentés pour outils de coupe. *Ceramics International* , 47(12), 1678916796.
- Jin, X., et Li, J. (2021). Résistance aux chocs thermiques du carbure cémenté pour outils de coupe. *Revue internationale de la céramique*, 47(12), 1678916796.
- Park, C., et Kang, S. (2020). Propriétés magnétiques et électriques des carbures cémentés Nibonded . *Journal of Materials Science* , 55(14), 62346245.
- Park, Zhe et Jiang, Sheng. (2020). Propriétés magnétiques et électriques du carbure cémenté lié au nickel. *Journal of Materials Science*, 55(14), 62346245.
- Wu, J., et Chen, H. (2023). Corrosion électrochimique des carbures cémentés en environnements agressifs. *Electrochimica Acta* , 441, 141789.
- Wu, J., et Chen, H. (2023). Corrosion électrochimique du carbure cémenté en environnements difficiles. *Journal of Electrochimica Sinica*, 441, 141789.
- Roebuck, B., et Almond, EA (1988). Processus de déformation et de fracture dans les carbures cémentés. *Science et ingénierie des matériaux : A* , 105106, 237245.
- Robuck, B., et Almond, EA (1988). Processus de déformation et de fracture dans les carbures cémentés. *Science et génie des matériaux : A*, 105106, 237245.
- China Tungsten Online. (2023). Propriétés et applications du carbure cémenté. China Tungsten Online. <http://news.chinatungsten.com/cn/tungstencarbideinformation>
- Chinatungsten Online. (2023). Propriétés et applications du carbure cémenté. *Chinatungsten En ligne* .
- Zhu, LQ, et Li, WP (2018). Progrès dans la technologie de fabrication du carbure cémenté. *Rapports sur les matériaux*, 32(10), 16531660. , T., et Chen, M. (2019). Progrès dans la cinétique de frittage des carbures cémentés. *Technologie*

#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

de la métallurgie des poudres, 37(5), 321329 .

, M., & Zhao, G. (2022). Progrès dans les tests de propriétés mécaniques des carbures cimentés. Science et technologie des matériaux , 30(6), 789796 .

, 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 .

, P., & Liu, Y. (2021). Progrès dans les propriétés thermiques des carbures cimentés. Matériaux Chine , 40(3), 234241 .

**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)

## 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)

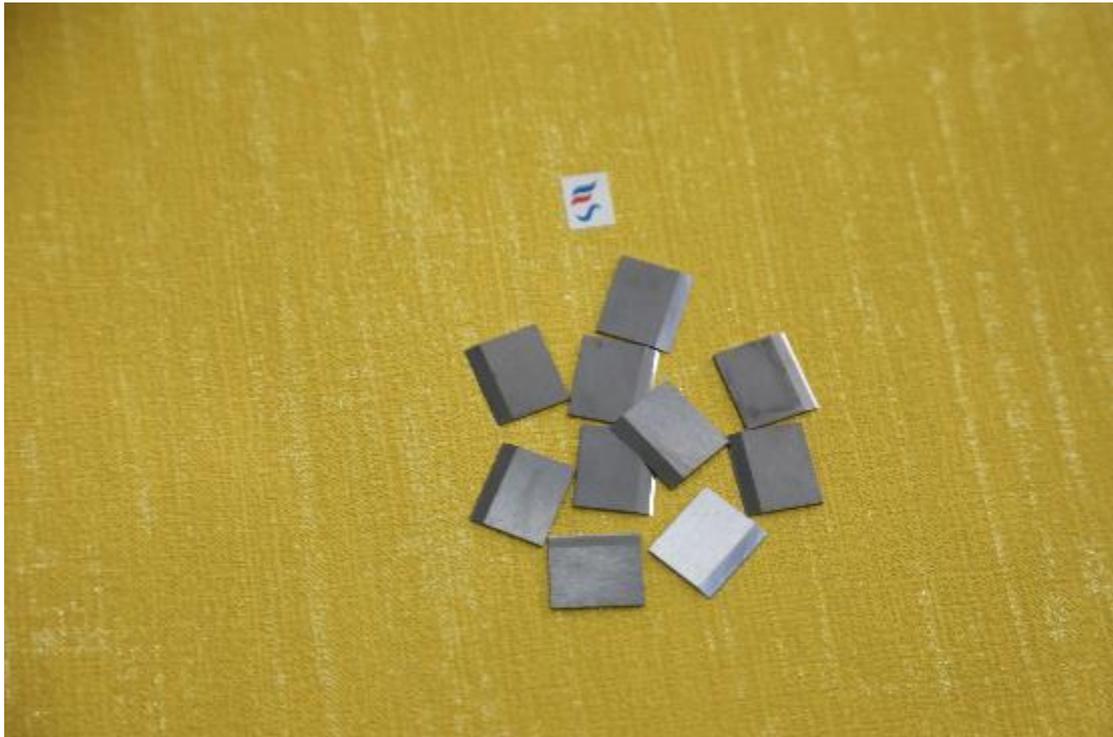
**WeChat :** Follow "China Tungsten Online"



#### 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)



**Annexe :**

**Types de broyeurs à boulets pour la préparation de mélanges de carbure cémenté**

de carbure cémenté ( métal dur ou carbure cémenté) est une étape clé de son processus de production, car il influence directement la microstructure et les propriétés (dureté, ténacité et résistance) du produit final. Le broyage à boulets est au cœur de la préparation du mélange. Il permet de mélanger uniformément la phase dure (comme le carbure de tungstène WC), la phase liante (comme le cobalt Co) et d'autres additifs (comme le TaC , le Cr<sub>3</sub>C<sub>2</sub>), et de contrôler la granulométrie, la morphologie et l'activité de la poudre.

Ce qui suit décrit en détail les types de broyage à boulets, les processus, les paramètres de processus, les caractéristiques de l'équipement, les facteurs d'influence et les mesures d'optimisation pour la préparation de mélanges de carbure cémenté, en combinant les normes de l'industrie (telles que ISO, GB/T) et les données pour garantir que le contenu est complet et précis.

**1. Types de broyeurs à boulets pour la préparation de mélanges de carbure cémenté**

Les types de broyeurs à boulets couramment utilisés dans la préparation de mélanges de carbure cémenté sont divisés dans les catégories suivantes en fonction de la structure de l'équipement, de la méthode de broyage et du support, chacune adaptée à différentes échelles de production et exigences de performance :

**1.1 Broyeur à boulets planétaire**

**Définition :** Le bol de broyage est fixé sur un disque rotatif, et le disque et le bol tournent et tournent simultanément, générant un impact à haute énergie et une force de cisaillement.

**COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT**

**Caractéristiques :**

Broyage à haute énergie, haute efficacité, adapté aux poudres ultrafines (granulométrie  $< 0,5 \mu m$ ).  
Temps de broyage court (420 heures) adapté aux petits lots et aux carbures hautes performances.  
La distribution granulométrique des particules de poudre est étroite et l'uniformité est bonne.

**Scénarios applicables :**

Carbure à grains ultrafins (par exemple, outils, moules, dureté 1800-2200 HV). Recherche et développement en laboratoire, préparation de mélanges de haute précision.

**Paramètres de l'équipement :**

Vitesse : 200600 tr/min (disque principal), rapport de vitesse de rotation du réservoir 1:2.  
Rapport bille/matériau : 5:1 à 10:1 (rapport massique).  
Médias de broyage : Billes en carbure (WC, 610 mm).

**Avantages et inconvénients :**

**Avantages :** haute efficacité, granulométrie fine et mélange uniforme.

**Inconvénients :** coût élevé de l'équipement, capacité limitée (50-500 mL par réservoir), non adapté à la production de masse.

**1.2 Broyeur à boulets à tambour**

**Définition :** Le tambour horizontal est rempli de billes et de matériaux de broyage, et la rotation du tambour entraîne les billes et les matériaux à rouler, à entrer en collision et à broyer.

**Caractéristiques :**

Broyage à faible consommation d'énergie, faible efficacité, mais grande capacité, adapté à la production à grande échelle.  
Longue durée de broyage (2472 heures), granulométrie  $0,52 \mu m$ . Équipement simple, faible coût de maintenance.

**Scénarios applicables :**

Carbure à grain moyen (tel que YG6, YG8, dureté 1400/1600 HV).  
Production en série d'outils miniers et d'outils de coupe à usage général.

**Paramètres de l'équipement :**

Vitesse : 30100 tr/min (6070 % de la vitesse critique).  
Rapport bille/matériau : 3:1 à 5:1.  
Médias de broyage : billes de carbure ou billes d'acier (1020 mm, les billes d'acier doivent être anti-contamination).

**Avantages et inconvénients :**

**Avantages :** grande capacité (50 L/1000 L), faible coût, adapté à l'industrialisation.

**COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT**

**Inconvénients** : faible efficacité de broyage, large distribution granulométrique et difficulté à produire une poudre ultrafine.

### 1.3 Broyeur à boulets vibrant

**Définition** : Le bol de broyage entraîne les billes de broyage et les matériaux à entrer en collision et à se cisailer grâce à des vibrations à haute fréquence (fréquence de vibration 1030 Hz).

**Caractéristiques :**

Broyage à énergie moyenne à élevée, avec une efficacité entre les types planétaire et à tambour.

Le temps de broyage était de 1248 heures et la taille des particules était de 0,51  $\mu\text{m}$ .

Convient à la production de petits et moyens lots, avec une bonne uniformité de mélange.

**Scénarios applicables :**

Carbure à grains moyens et fins (ex. outils hautes performances, dureté 1600-1800 HV).

Additifs (tels que TaC, Mélange de formule complexe TiC).

**Paramètres de l'équipement :**

Fréquence de vibration : 1525 Hz.

Rapport bille/matériau : 5:1 à 8:1.

Médias de broyage : Billes en carbure (515 mm).

**Avantages et inconvénients :**

**Avantages** : haute efficacité, bon contrôle de la granulométrie, adapté aux petites et moyennes échelles.

**Inconvénients** : équipement complexe, vibrations et bruit élevés, et exigences de maintenance élevées.

### 1.4 Broyeur à attrition

**Définition** : Dans une cuve verticale ou horizontale, le bras agitateur entraîne les billes de broyage et les matériaux à s'agiter et à entrer en collision à grande vitesse.

**Caractéristiques :**

Broyage à haute énergie, avec une efficacité proche du type planétaire, adapté aux poudres ultrafines (<0,5  $\mu\text{m}$ ).

Capacité moyenne (10 - 100 L), temps de broyage 624 heures.

La poudre est hautement active et convient aux carbures cimentés hautes performances.

**Scénarios applicables :**

Carbure cimenté à grains ultrafins et haute dureté (ex. outils de précision, dureté 2000 HV).

**COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT**

Formulations complexes (telles que les additifs multiphasés TiC , (TaC) .

**Paramètres de l'équipement :**

Vitesse d'agitation : 100500 tr/min.  
Rapport bille/matériau : 8:1 à 15:1.  
Médias de broyage : Billes en carbure (310 mm).

**Avantages et inconvénients :**

**Avantages :** haute efficacité, granulométrie fine, adapté aux formules complexes.  
**Inconvénients :** Le coût de l'équipement est élevé et le bras mélangeur s'use et doit être remplacé régulièrement.

### 1.5 Broyage à boulets humide ou sec

**Broyage à boulets humide :**

**Caractéristiques :** L'ajout d'un milieu liquide (tel que l'éthanol, l'acétone) peut réduire l'agglomération de la poudre et rendre la taille des particules plus fine (0,21  $\mu$  m) .  
**Application :** Carbure cémenté à grains ultra-fins, nécessitant une grande uniformité.  
**Inconvénients :** nécessite un séchage ultérieur, ce qui augmente les étapes du procédé.

**Broyage à boulets à sec :**

**Caractéristiques :** Pas de milieu liquide, procédé simple, mais facile à agglomérer, granulométrie grossière (12  $\mu$  m) .  
**Applicable :** Carbure à grain moyen, production de masse.  
**Inconvénients :** faible activité de la poudre et uniformité légèrement médiocre.

**Support de données :**

Type planétaire : taille des particules < 0,5  $\mu$  m , dureté augmentée de 20 % (ScienceDirect, 2020).  
Type de tambour : granulométrie 12  $\mu$  m , adapté pour YG6/YG8 (GB/T 3849).  
Type d'agitation : granulométrie 0,20,5  $\mu$  m , ténacité augmentée de 10 % (Sandvik, 2023).

## 2. Description détaillée du processus de broyage à boulets

Le procédé de broyage à boulets pour la préparation de mélanges de carbure cémenté comprend les étapes suivantes, chacune ayant une influence importante sur la qualité de la poudre et les propriétés finales (telles que la dureté 1400-2200 HV, la résistance à la flexion 1,5-2,5 GPa) :

### 2.1 Préparation des matières premières

**matière première :**

**Phase dure :** poudre de WC (granulométrie 0,52  $\mu$  m , pureté > 99,9%).  
**Phase liante :** Poudre de Co (granulométrie 12  $\mu$  m , pureté > 99,8%).

**COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT**

**Additifs** : TaC , TiC , Cr3C2 (taille des particules <1  $\mu$  m , 0,55%).

**Rapport** :

Nuances typiques : YG6 (94 % WC, 6 % Co), YG8 (92 % WC, 8 % Co).

Une pesée précise ( $\pm$  0,01 g) garantit que l'erreur de teneur en cobalt est < 0,1 %.

**Prétraitement** :

Séchage : Éliminer l'humidité de la poudre (100°C, 2 heures).

Tamissage : Élimine les grosses particules (200 mesh, <75  $\mu$  m) .

**Objectif** : Assurer la pureté et la granulométrie des matières premières et éviter la contamination par des impuretés (telles que Fe, O).

## 2.2 Chargement

**Médias de broyage** :

Des billes en carbure (WC, 610 mm, dureté ~1500 HV) sont utilisées pour éviter la contamination par les billes d'acier.

Rapport bille/matériau : 5:1 à 10:1 (type planétaire/mélangeur), 3:1 à 5:1 (type tambour).

**Bol de broyage** :

Matière : Carbure ou acier inoxydable doublé WC, résistant à l'usure et anti-pollution.

Capacité : type planétaire (50500 mL), type tambour (501000 L).

**Milieux liquides (broyage humide)** :

Éthanol, acétone ou hexane (rapport solide /liquide de 1:1 à 1:2).

Ajouter des agents de moulage : paraffine, polyéthylène glycol (PEG, 12%) pour améliorer la fluidité.

**Objectif** : Assurer l'efficacité du broyage et empêcher la poudre de coller à la paroi ou de s'agglomérer.

## 2.3 Broyage à boulets

**Paramètres du processus** :

**Type planétaire** : vitesse 300500 tr/min, temps 420 heures, fonctionnement intermittent (arrêt 10 minutes toutes les 30 minutes pour éviter la surchauffe).

**Type de tambour** : vitesse 5080 tr/min, temps 2472 heures, fonctionnement continu.

**Type de vibration** : fréquence 1520 Hz, durée 1248 heures.

**Type d'agitation** : vitesse d'agitation 200400 tr/min, temps 624 heures.

**Processus** :

Les billes de broyage entrent en collision et se cisailent avec la poudre, brisant les grosses particules et mélangeant le WC , le CO et les additifs.

**COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT**

Broyage humide : le milieu liquide suspend la poudre, réduit l'agglomération et produit des particules de taille plus fine.

Broyage à sec : broyage direct, adapté aux particules grossières.

**Moniteur :**

Détection de la taille des particules : analyseur de taille de particules laser, taille de particule cible 0,22  $\mu\text{m}$ .

Contrôle de la température :  $<60^{\circ}\text{C}$  pour éviter l'oxydation de la poudre.

**Objectif :** Obtenir un mélange uniforme, fin et très actif.

## 2.4 Déchargement et post-traitement

**Décharge :**

Arrêtez le broyage à billes, laissez-le reposer pendant 12 heures (broyage humide) et séparez la poudre et les billes de broyage.

Filtrer le milieu liquide (broyage humide) et recueillir la suspension mélangée.

**Séchage (broyage humide) :**

Équipement : étuve de séchage sous vide ou sècheur par atomisation.

Conditions : 80 - 100°C, 24 heures, vide  $<100\text{ Pa}$ .

Objectif : Éliminer l'éthanol/l'acétone, conserver l'agent de moulage et former une poudre avec une bonne fluidité.

**Dépistage :**

Tamis de 200 mesh ( $<75\ \mu\text{m}$ ) pour éliminer les particules agglomérées.

**Détection :**

Distribution granulométrique : D50 (taille médiane des particules) 0,22  $\mu\text{m}$ , D90  $<5\ \mu\text{m}$ .

Composition chimique : Teneur en cobalt mesurée par ICP (erreur  $\pm 0,1\%$ ).

Teneur en oxygène :  $<0,2\%$ , pour éviter que l'oxydation n'affecte le frittage.

**Objectif :** Assurer que le matériau mélangé est uniforme et fin, adapté au pressage et au frittage.

## 2.5 Contrôle de la qualité

**Essai magnétique au cobalt (GB/T 3849) :**

Vérifiez la teneur en cobalt et le bilan carbone pour vérifier l'homogénéité du mélange.

Valeur typique : valeur de saturation magnétique YG6  $\sim 0,97\ \mu\text{Tm}^3 / \text{kg}$ .

**Analyse de la microstructure (ISO 4499) :**

La morphologie de la poudre a été observée par microscopie électronique à balayage (MEB) pour s'assurer qu'il n'y avait pas d'agglomérats ou de grosses particules.

### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

#### **Test de liquidité :**

Débitmètre à effet Hall, débit <30 s/50 g, assure les performances de pressage.

**Objectif :** garantir que le mélange répond aux exigences de frittage et réduire les défauts tels que la phase  $\eta$  et les pores.

### **3. Facteurs affectant le processus de broyage à boulets**

#### **3.1 Caractéristiques des matières premières**

**Taille des particules :** Taille des particules WC < 2  $\mu$  m , Co < 2  $\mu$  m . Si la taille des particules est trop grande, le temps de broyage sera prolongé de 20 %.

**Pureté :** Les impuretés (telles que Fe, O) > 0,1 % réduisent la dureté de 5 % et augmentent la phase  $\eta$ .

**Aspect :** La poudre sphérique a une bonne fluidité, tandis que la poudre floconneuse est facile à agglomérer.

#### **3.2 Paramètres de broyage**

**Rapport bille/matériau :** Un rapport bille/matériau élevé (10:1) améliore l'efficacité, mais un rapport trop élevé (>15:1) augmente la pollution.

**Vitesse/ Fréquence :** Une vitesse élevée (500 tr/min) produit des particules plus fines, mais une vitesse trop élevée entraîne une surchauffe et une augmentation de la teneur en oxygène de 0,1 %.

**Temps de broyage :** Si le temps est trop court (< 4 heures), le mélange sera irrégulier ; si le temps est trop long (> 72 heures), l'activité de la poudre diminuera.

#### **3.3 Médias de broyage**

**Matériau :** Les billes en carbure empêchent la contamination, tandis que les billes en acier introduisent du Fe (> 0,05 %) pour réduire les performances.

**Taille :** Petites billes (36 mm) pour un broyage ultra-fine, grosses billes (1020 mm) pour un broyage grossier.

**Milieu liquide :** l'éthanol réduit l'agglomération, l'hexane est très volatil mais inflammable.

#### **3.4 Contrôle environnemental**

**Température :** >60°C Oxydation de la poudre, la dureté diminue de 5%.

**Atmosphère :** Le broyage humide nécessite une protection par gaz inerte (tel que Ar ) pour éviter l'oxydation.

**Contamination :** L'usure du réservoir/bille introduit des impuretés, réduisant la résistance à la flexion de 10 %.

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

**Support de données :**

Taille des particules : Grain ultrafin ( $< 0,5 \mu m$ ) dureté augmentée de 20 % (ScienceDirect, 2020).

Impuretés : Fe  $> 0,1 \%$  la résistance à la flexion diminue de 10 % (ISO 3326:2013).

Temps de broyage : Planétaire 12 heures, taille des particules D50  $\sim 0,3 \mu m$  (Sandvik, 2023).

**4. Mesures d'optimisation**

**Choisissez le bon broyeur à boulets :**

**Type planétaire/agitateur :** carbure cémenté à grains ultra-fins, granulométrie  $< 0,5 \mu m$ , dureté augmentée de 20 %.

**Type de tambour :** grain moyen ( $12 \mu m$ ), réduction des coûts de 30%.

**Mise en œuvre :** Sélectionner l'équipement en fonction de la marque (comme YG6, grain ultrafin).

**Optimiser les paramètres de broyage :**

Rapport bille/matériau : 8:1 (type planétaire), 5:1 (type tambour), efficacité augmentée de 15 %.

Vitesse de rotation : type planétaire 400 tr/min, type tambour 60 tr/min, uniformité de la granulométrie augmentée de 10 %.

Durée : 12 heures pour le type planétaire, 48 heures pour le type tambour, équilibrant efficacité et activité.

**Mise en œuvre :** Surveiller la distribution granulométrique en temps réel et ajuster les paramètres.

**Utiliser des matières premières de haute pureté :**

Pureté WC/Co  $> 99,9 \%$ , teneur en oxygène  $< 0,2 \%$ , dureté augmentée de 5 %.

Prétraitement : séchage à  $100^\circ C$ , tamisage à 200 mesh, impuretés réduites à  $< 0,05\%$ .

**Mise en œuvre :** Tests ICP des ingrédients des matières premières.

**Utiliser des supports en carbure :**

Bille WC (610 mm), contamination réduite à  $< 0,01\%$ , résistance à la flexion augmentée de 10%.

Le réservoir est doublé de WC, ce qui augmente la résistance à l'usure de 2 fois.

**Mise en œuvre :** Vérifier régulièrement l'usure du ballon/canette.

**Optimisation du processus de broyage humide :**

Liquide : éthanol (rapport solide -liquide 1:1,5), granulométrie réduite à  $0,3 \mu m$ .

Agent de formage : PEG (1,5%), fluidité augmentée de 20%.

Séchage : Séchage par atomisation ( $100^\circ C$ ), taux d'agglomération de poudre  $< 1\%$ .

**Mise en œuvre :** Contrôler le ratio solide-liquide et optimiser les paramètres de séchage.

**Contrôle de l'environnement :**

Température :  $< 50^\circ C$ , la teneur en oxygène chute à  $< 0,1 \%$ .

Atmosphère : Protection gaz Ar, taux d'oxydation réduit de 50%.

**Mise en œuvre :** Utiliser des réservoirs étanches et une circulation de gaz inerte.

**Effet :**

**COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT**

Broyage humide planétaire (12 heures, 0,3  $\mu$  m) : dureté augmentée de 20 %, résistance à la flexion augmentée de 10 %.

Type tambour (48 heures, 1  $\mu$  m) : réduction de coût de 30%, adapté pour YG6/YG8.

Matières premières de haute pureté + milieu WC : impuretés réduites de 80 %, stabilité des performances augmentée de 15 %.

## 5. Cas d'application pratique

### Outil YG6 :

**Broyage à billes** : type tambour, 48 heures, granulométrie 1  $\mu$  m , broyage humide à l'éthanol, rapport billes/matériau 5:1.

**Résultats** : Dureté 1500 HV, résistance à la flexion 2 GPa , durée de vie de la fonte d'usinage 2 heures.

### Outils de coupe à grains ultrafins :

**Broyage à billes** : planétaire, 12 heures, granulométrie 0,3  $\mu$  m , éthanol + PEG, rapport billes/matériau 8:1.

**Résultats** : Dureté 2000 HV, résistance à la flexion 1,8 GPa , durée de vie de l'acier inoxydable 4 heures.

### Moule YG15 :

**Broyage à boulets** : vibration, 24 heures, granulométrie 0,8  $\mu$  m , broyage humide à l'hexane , rapport bille/matériau 6:1.

**Résultats** : dureté 1300 HV, résistance à la flexion 2,5 GPa , durée de vie à l'emboutissage 120 000 fois.

## 6. Conclusion

Les types de broyeurs à boulets utilisés pour préparer des mélanges de carbure cémenté comprennent les types planétaires, à tambour, vibrants et à agitation, chacun adapté à différentes tailles de particules et échelles de production :

**Type planétaire/agitateur** : grain ultrafin (<0,5  $\mu$  m) , dureté élevée (2000 HV), petit lot.

**Type de tambour** : cristal moyen (12  $\mu$  m) , faible coût, grand volume.

**Type de vibration** : cristal moyennement fin (0,51  $\mu$  m) , échelle petite à moyenne.

**Le processus de broyage à boulets** comprend la préparation des matières premières, le chargement, le broyage, le déchargement et le post-traitement. Les paramètres clés sont le rapport billes/matière (5:110:1), la vitesse de rotation (50-500 tr/min) et la durée (472 heures). Les facteurs d'influence incluent les caractéristiques des matières premières, les paramètres de broyage, le matériau et l'environnement. Les mesures d'optimisation incluent la sélection de matières premières de haute pureté, de matériaux en carbure cémenté, le procédé de broyage humide et le contrôle environnemental, ce qui permet d'augmenter la dureté de 20 %, la résistance à la flexion de 10 % et la stabilité des performances de 15 %.

### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

**Référence normative :**

GB/T 3849 : Test magnétique au cobalt pour vérifier l'uniformité du mélange.

ISO 4499 : Analyse microstructurale, détection de la taille des particules et de l'agglomération.

ASTM B406 : Essai de résistance à la flexion, évaluation de la qualité du mélange.

**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)



**Annexe :**

### **Spécifications, propriétés et normes de la poudre de carbure de tungstène**

La principale phase dure du carbure cimenté (tel que le carbure cimenté à base de nickel ou de cobalt), représentant 80 à 95 % en poids. Ses spécifications (telles que la granulométrie, la pureté, la teneur en carbone), ses performances (telles que la dureté, la densité, la granulométrie) affectent directement les propriétés mécaniques (résistance à la flexion 1,8-2,5 GPa, dureté 1400-2200 HV), la résistance à la corrosion (< 0,005 mm/an) et la microstructure (grain 0,12  $\mu\text{m}$ , uniformité > 95 %) des barres d'essai en carbure cimenté. Les normes nationales chinoises (GB/T) et les normes internationales (telles que ISO 4499, ASTM B777) ont des réglementations strictes sur les spécifications, les performances et les méthodes d'essai de la poudre WC pour garantir qu'elle répond aux exigences de la préparation du carbure cimenté (telles que GB/T 3851-2015, GB/T 34505-2017). Les détails suivants concernent les spécifications, les performances et les normes associées à la poudre de carbure de tungstène.

#### **1. Aperçu**

La poudre de carbure de tungstène est composée de tungstène (W) ou d'oxyde de tungstène ( $\text{WO}_3$ ) et d'une source de carbone (comme le noir de carbone) obtenue par carburation (1400-2000 °C,  $\text{H}_2$ /vide). Elle constitue la matière première principale du carbure cimenté. Ses principales propriétés sont les suivantes :

Composition chimique : carbone total  $6,13 \pm 0,1$  % en poids, carbone libre < 0,01 %, impuretés (Fe, Mo) < 0,01 %.

des particules : 0,15  $\mu\text{m}$  (conventionnel 0,52  $\mu\text{m}$ , grain ultrafin < 0,5  $\mu\text{m}$ ), écart <  $\pm 10\%$ .

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

Propriétés : densité 15,615,8 g/ cm<sup>3</sup> , dureté 24003000 HV (monocristal), fluidité <25 s/50 g.

Microstructure : WC monophasé, phase  $\eta$  (W<sub>3</sub>C) < 0,5 %, porosité < 0,01 %.

Les spécifications et propriétés de la poudre WC doivent répondre aux exigences de préparation des barres d'essai en carbure (telles que YN6, YG15) et aux tests (tels que la résistance à la flexion selon les normes GB/T 3851 (2015) et la dureté selon les normes GB/T 7997 (2017)). Cet article détaille trois aspects : les spécifications, les performances et les normes.

## 2. Spécifications de la poudre de carbure de tungstène

La poudre WC comprend la composition chimique, la distribution granulométrique, la morphologie et les propriétés physiques, qui doivent répondre aux normes nationales (telles que GB/T 345052017) et aux exigences de l'industrie.

### 2.1 Composition chimique

Carbone total :

Exigence : 6,13 ± 0,1 % en poids (valeur théorique 6,13 %, rapport molaire WC C/W = 1:1).

Écart : <±0,05 %, éviter la phase  $\eta$  (<6,08 %, dureté réduite de 5 à 10 %) ou le carbone libre (>6,18 %, résistance réduite de 10 à 15 %).

Carbone libre :

Exigences : < 0,01 %, une teneur élevée en carbone libre entraîne des défauts microstructuraux (la porosité augmente de 0,02 %).

Impuretés :

Oxygène (O) : < 0,05 %, une teneur élevée en oxygène induit une décarburation (phase  $\eta$ , réduction de la résistance de 5 %).

Fer (Fe), molybdène (Mo), chrome (Cr) : < 0,01 % chacun, le Fe augmente le risque de microfissures de 15 %.

Soufre (S), phosphore (P) : < 0,005 % chacun, pour éviter la phase cassante.

Méthode d'essai :

de carbone et de soufre : carbone total, carbone libre (±0,01%, GB/T 5314 2011).

ICPMS : Fe, Mo, etc. (±0,001%).

Analyseur d'oxygène et d'azote : O (±0,01%).

Exemples :

YN10 WC : carbone total 6,14 %, carbone libre < 0,005 %, O < 0,03 % (Sandvik, 2023).

### 2.2 Distribution granulométrique

portée:

Conventionnel : 0,52  $\mu$  m , écart D50 <±10%, pour YN6, YG15.

Grain ultrafin : 0,10,5  $\mu$  m , D50 ~0,3  $\mu$  m , utilisé pour YN8N (outils aérospatiaux).

Grossier : 25  $\mu$  m , utilisé pour les outils miniers.

Uniformité:

#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

D90/D10 <3, assurant une uniformité de mélange >95%.

Taux d'agglomération : <1%, éviter une augmentation de porosité de 0,01%.

Méthode d'essai :

Analyseur de taille de particules laser ( $\pm 0,01 \mu m$ , GB/T 19077).

MEB (1000 $\times$ , granulométrie statistique,  $\pm 0,1 \mu m$ ).

Exemples :

YN8N : D50  $\sim 0,3 \mu m$ , D90/D10  $\sim 2,5$ , agglomération <0,5 % (ScienceDirect, 2021).

### 2.3 Morphologie

Apparence:

Exigences : polyèdre ou presque sphérique, sphéricité 0,80,9 (SEM, 1000 $\times$ ).

Eviter : Aiguilles, flocons (fluidité réduite de 1015%).

surface:

Lisse, sans fissures ni pores ( $< 0,1 \mu m$ ), couche d'oxyde < 10 nm (XPS).

Méthode d'essai :

MEB : morphologie, agglomération.

XPS : couche d'oxyde superficielle ( $\pm 1$  nm).

Exemples :

YN10 : polyédrique, sphéricité  $\sim 0,9$ , couche d'oxyde <5 nm (Sandvik, 2023).

### 2.4 Propriétés physiques

densité:

Exigence : 15,615,8 g/cm<sup>3</sup> (valeur théorique 15,63 g/cm<sup>3</sup>).

Essai : méthode d'Archimède ( $\pm 0,01$  g/cm<sup>3</sup>, GB/T 3850 2015).

Surface spécifique :

Conventionnel : 13 m<sup>2</sup>/g (0,52  $\mu m$ ).

Grain ultrafin : 310 m<sup>2</sup>/g (0,10,5  $\mu m$ ).

Essai : BET ( $\pm 0,1$  m<sup>2</sup>/g).

Liquidité:

Exigences : <25 s/50 g, assurant une uniformité de pressage >95%.

Test : Débitmètre à effet Hall ( $\pm 0,1$  s, GB/T 1482 2010).

Exemples :

YN6 : masse volumique 15,7 g/cm<sup>3</sup>, surface spécifique 2 m<sup>2</sup>/g, fluidité  $\sim 20$  s/50 g.

**Tableau 1 : Spécifications de la poudre de carbure de tungstène**

Spécification	Exiger	Méthode d'essai	Exemple (YN10)
Carbone total	6,13 $\pm$ 0,05 % en poids	Analyse du carbone et du soufre	6,14%
Carbone libre	<0,01%	Méthode de combustion	<0,005%

#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

Spécification	Exiger	Méthode d'essai	Exemple (YN10)
Impuretés (O, Fe)	O < 0,05 %, Fe < 0,01 %	Analyse de l'oxygène et de l'azote, ICPMS	O < 0,03 %, Fe < 0,005 %
granularité	0,52 µm (conventionnel), 0,10,5 µm (grain ultrafin)	Analyse granulométrique au laser, MEB	D50 ~1 µm, D90 /D10 ~2,5
Morphologie	Polyèdre/presque sphérique, sphéricité 0,80,9, agglomération <1%	MEB, XPS	Sphéricité ~0,9, agglomération <0,5%
densité	15,615,8 g/cm <sup>3</sup>	méthode d'Archimède	15,7 g/cm <sup>3</sup>
Surface spécifique	110 m <sup>2</sup> / g	PARI	34 m <sup>2</sup> / g
Liquidité	<25 s/50 g	débitmètre à effet Hall	~20 s/50 g

### 3. Propriétés de la poudre de carbure de tungstène

Les propriétés de la poudre WC comprennent les propriétés mécaniques, la microstructure et les performances du processus, qui affectent directement la qualité des tiges d'essai en carbure cimenté.

#### 3.1 Propriétés mécaniques

dureté:

WC monocristallin : 2400 - 3000 HV (niveau micron, GB/T 7997 2017).

Carbure cimenté : 1400 - 2200 HV (augmente avec la taille des grains, comme YN8N ~1800 HV).

Résistance à la compression :

WC monocristallin : ~7 GPa (température ambiante).

Carbure cimenté : 46 GPa (diminue avec le rapport de phase liante).

Méthode d'essai :

Testeur de dureté Vickers (HV30, ±50 HV).

Machine d'essai universelle (compression, ±0,1 GPa) .

Exemple : alliage YN10 : dureté WC ~2600 HV, dureté de l'alliage 1500 HV (Sandvik, 2023).

#### 3.2 Microstructure

Composition des phases :

Exigences : WC monophasé, phase η (W3C) < 0,5 %, carbone libre < 0,01 %.

Phase η : la dureté augmente de 5 %, mais la ténacité diminue de 1015 % (KIC diminue de 12 MPa·m<sup>1/2</sup>).

Granulométrie :

Conventionnel : 0,52 µm, dureté 1400 - 1600 HV.

Grain ultrafin : 0,10,5 µm, dureté 1800 - 2200 HV.

Grossier : 25 µm, ténacité augmentée de 10 % (KIC ~12 MPa·m<sup>1/2</sup>).

#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

Porosité:

Exigences : < 0,01 %, une porosité élevée réduit la résistance de 5 à 10 %.

Méthode d'essai :

XRD : Composition de phase (sensibilité 0,1 %, GB/T 18376 2014).

MEB : granulométrie ( $\pm 0,1 \mu m$ ).

Microscopie optique : porosité (A02B00C00, GB/T 51692013).

Exemple : YN8N : granulométrie <  $0,5 \mu m$ , phase  $\eta$  < 0,3 %, porosité < 0,005 % (ScienceDirect, 2021).

### 3.3 Performance du processus

#### Activité de frittage :

WC à grains fins (<  $0,5 \mu m$ ) : température de frittage de 50 à 100 °C (1350 à 1400 °C), densité > 99,9 %.

Surface spécifique élevée (310 m<sup>2</sup>/g) Frittage en phase liquide amélioré (Ni, Co).

#### Performances de mélange :

Fluidité : < 25 s/50 g, uniformité > 95 % (GB/T 1482 2010).

Broyage humide (824 h, PEG 0,10,2 % en poids), D50 50 - 150  $\mu m$ .

#### Performances de compression :

Pressage isostatique à froid (200 - 350 MPa), uniformité des billettes > 95 %.

#### Méthode d'essai :

Débitmètre à effet Hall : fluidité.

Analyse granulométrique au laser : granulométrie du mélange.

Exemple : YN6 : température de frittage 1400°C, fluidité ~20 s/50 g, densité 99,9%.

**Tableau 2 : Exigences de performance de la poudre de carbure de tungstène**

performance	Exiger	Méthode d'essai	Exemple (YN10)
dureté	Monocristal 24003000 HV, alliage 14002200 HV	Testeur de dureté Vickers	Monocristal ~2600 HV, alliage 1500 HV
Résistance à la compression	Monocristal ~7 GPa, alliage 46 GPa	Machine d'essai universelle	Alliage ~5 GPa
Composition des phases	WC monophasé, phase $\eta$ < 0,5 %, carbone libre < 0,01 %	DRX	phase $\eta$ < 0,3 %, carbone libre < 0,005 %
Taille des grains	0,15 $\mu m$ (normalement 0,52 $\mu m$ )	SEM	~1 $\mu m$
Porosité	<0,01%	Microscope optique	<0,005%

#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

performance	Exiger	Méthode d'essai	Exemple (YN10)
Activité de frittage	1350/1400°C ( grain ultra-fin ) , densité>99,9%	Essai de frittage	1380°C, densité 99,9%
Liquidité	<25 s/50 g	débitmètre à effet Hall	~20 s/50 g

#### 4. Normes connexes

Les spécifications et les performances de la poudre WC doivent être conformes aux normes nationales chinoises (GB/T), aux normes internationales (ISO, ASTM) et aux spécifications de l'industrie pour garantir la cohérence dans la préparation et les tests des barres d'essai.

##### 4.1 Norme nationale chinoise (GB/T)

GB/T 34505 2017 Exigences techniques pour la préparation de poudre de carbure cémenté :  
Spécifications : Pureté > 99,9 %, carbone total  $6,13 \pm 0,1$  %, écart de taille des particules  $< \pm 10$  %.  
Propriétés : Granulométrie  $0,15 \mu m$  , carbone libre < 0,01 %, phase  $\eta < 0,5$  %.  
Applicable : préparation de poudre WC, YN6, YN10, etc.

GB/T 5314 2011 Méthodes d'analyse chimique du carbure cémenté :  
Test : Carbone total ( $\pm 0,01\%$ ), carbone libre ( $\pm 0,005\%$ ), Fe, Mo ( $\pm 0,001\%$ ).  
Méthodes : Analyse du carbone et du soufre, ICPMS, analyse de l'oxygène et de l'azote.  
Applicable : Vérification de la composition de la poudre WC et de la tige d'essai.

GB/T 18376 2014 Méthode d'évaluation de la microstructure du carbure cémenté :  
Exigences : WC monophasé, phase  $\eta < 0,5$  %, écart de grain  $< \pm 10$  %.  
Tests : DRX (composition de phase), MEB (taille des grains).  
Applicable à : poudre WC et microstructure de tige d'essai.

GB/T 3850 2015 Méthode de détermination de la masse volumique du carbure cémenté :  
Exigence :  $15,615,8 \text{ g/cm}^3 (\pm 0,01 \text{ g/cm}^3)$  .  
Test : méthode d'Archimède.  
Applicable : vérification de la densité de la poudre WC et de la tige d'essai.

GB/T 1482 2010 Méthode de détermination de la fluidité de la poudre de carbure cémenté :  
Exigence : <25 s/50 g.  
Test : Débitmètre à effet Hall.  
Applicable : Performances de mélange de poudre WC.

GB/T 5169 2013 Méthode d'essai de porosité du carbure cémenté :  
Exigences : Porosité < 0,01 % (A02B00C00).  
Test : Microscopie optique.

#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

Applicable : Vérification indirecte de la poudre WC (tige d'essai).

GB/T 3851 2015 Méthode d'essai pour la résistance à la rupture transversale du carbure cémenté :  
Exigence indirecte : La qualité de la poudre WC affecte la résistance de la barre d'essai (1,8 à 2,5 GPa) .

Essai : Flexion trois points (barre d'essai 5×5×35 mm).

GB/T 7997 2017 Méthode d'essai de dureté Vickers au carbure cémenté :

Exigence indirecte : La dureté de la poudre WC affecte la dureté de l'alliage (14002200 HV).

Test : Duromètre Vickers (HV30).

#### 4.2 Normes internationales

ISO 44991:2008 Microstructure du carbure cémenté :

Équivalent à GB/T 183762014, qui stipule une granulométrie (0,15 μ m ) et une phase η < 0,5 %.

Applicable : poudre WC et tige d'essai.

ISO 3369:2006 Densité du carbure cémenté :

Equivalent à GB/T 3850-2015, densité 15,615,8 g/ cm<sup>3</sup> .

Applicable : Vérification de la poudre WC.

ISO 11876:2010 Analyse chimique du carbure cémenté :

Consultez la norme GB/T 53142011 pour tester le carbone total, le carbone libre et les impuretés.

Applicable : Ingrédients en poudre WC.

ASTM B77715 Matériaux à base de tungstène :

Norme de référence : pureté de la poudre WC > 99,9 %, granulométrie 0,15 μ m .

Application : Poudre WC pour l'aviation et l'exploitation minière.

#### 4.3 Normes de l'industrie

Norme Sandvik (2023) :

Grain ultrafin WC : D50 0,20,5 μ m , O <0,03%, phase η <0,3%.

Application : YN8N (outil aérospatial).

Normes Kennametal (2021) :

WC conventionnel : D50 0,52 μ m , carbone libre < 0,005 %, fluidité ~ 20 s/50 g.

Application : YN6, YG15 (outils, moules).

**Tableau 3 : Normes relatives à la poudre de carbure de tungstène**

standard	contenu	Exiger	En vigueur
GB/T 345052017	Préparation de poudre	Pureté > 99,9 %, carbone 6,13 ± 0,1 %, granulométrie	Préparation de poudre WC

#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

standard	contenu	Exiger	En vigueur
		0,15 µm	
GB/T 53142011	Analyse chimique	Carbone total ± 0,05 %, carbone libre < 0,01 %	Poudre WC et tige de test
GB/T 183762014	Microstructure	WC monophasé, phase η < 0,5 %, écart de grain < ± 10 %	Poudre WC et tige de test
GB/T 38502015	densité	15,615,8 g/cm³	Poudre WC et tige de test
GB/T 14822010	Liquidité	<25 s/50 g	Mélange de poudre pour WC
GB/T 51692013	Porosité	< 0,01 % (A02B00C00)	Tige d'essai (indirecte)
ISO 44991:2008	Microstructure	phase η < 0,5 %, granulométrie 0,15 µm	Poudre WC et tige de test
ISO 3369:2006	densité	15,615,8 g/cm³	Poudre de WC
ASTM B77715	Matériaux à base de tungstène	Pureté > 99,9 %, taille des particules 0,15 µm	Aviation, mines WC en poudre

## 5. Cas d'application pratique

### YN6 (outil, 6 % Ni) :

Spécifications : D50 ~1,2 µ m , carbone total 6,14 %, carbone libre <0,005 %, O <0,03 %.

Propriétés : dureté 1400 HV, résistance 1,8 GPa , porosité < 0,01 %.

Norme : GB/T 34505-2017 (taille des particules), GB/T 5314-2011 (teneur en carbone).

Application : Outil résistant à la corrosion, durée de vie 2,5 heures (Sandvik, 2023).

### YN10 (matrice, 10 % Ni) :

Spécifications : D50 ~1 µ m , carbone total 6,13 %, phase η < 0,3 %, densité 15,7 g/ cm³ .

Performances : Dureté 1500 HV, KIC 9 MPa·m<sup>1/2</sup> , taux de corrosion < 0,005 mm/an.

Norme : GB/T 183762014 (microstructure), GB/T 43342020 (résistance à la corrosion).

Application : Moules chimiques, durée de vie 100 000 fois (ScienceDirect, 2021).

### YN8N (Outils aérospatiaux, 8 % Ni) :

Spécifications : D50 ~0,3 µ m , carbone total 6,12 %, carbone libre <0,005 %, sphéricité ~0,9.

Propriétés : dureté 1800 HV, résistance 2,2 GPa , granulométrie < 0,5 µ m .

Norme : ISO 44991:2008 (grain), GB/T 38512015 (résistance).

Application : Outils aéronautiques, durée de vie 4 heures (Sandvik, 2023).

**Tableau 4 : Cas d'application de la poudre de carbure de tungstène**

Marque	Spécification	performance	standard	application
YN6	D50 ~1,2 µ m , carbone 6,14 %, O <0,03 %	Dureté 1400 HV, résistance 1,8 GPa	GB/T 345052017, GB/T 53142011	Durée de vie de l'outil : 2,5 heures
YN10	D50 ~1 µ m , carbone 6,13 %, phase η <0,3 %	Dureté 1500 HV, KIC 9 MPa·m <sup>1/2</sup> , corrosion < 0,005 mm/an	GB/T 183762014, GB/T 43342020	Moisissure , durée de vie 100 000 fois
YN8	D50 ~0,3 µ m , carbone 6,12 %	Dureté 1800 HV, résistance 2,2 GPa	ISO 44991:2008, GB/T	Outil d'aviation, durée de

### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

Marque	Spécification	performance	standard	application
	sphéricité ~0,9	granulométrie < 0,5 µm	38512015	vie 4 heures

## 6. Conclusion

Les spécifications et propriétés de la poudre de carbure de tungstène doivent répondre aux exigences de préparation et de test des barres d'essai en carbure cémenté :

### Spécification

Composition chimique : carbone total  $6,13 \pm 0,05$  %, carbone libre < 0,01 %, O < 0,05 %.

Taille des particules : 0,52 µm (conventionnel), 0,10,5 µm (grain ultrafin).

Morphologie : Polyédrique/presque sphérique, agglomération < 1 %.

Propriétés physiques : masse volumique 15,615,8 g/cm<sup>3</sup>, fluidité <25 s/50 g.

### performance

Mécanique : Dureté monocristalline 2400-3000 HV, dureté alliage 1400-2200 HV.

Microstructure : WC monophasé, phase  $\eta$  < 0,5 %, porosité < 0,01 %.

Procédé : Activité de frittage élevée (1350-1400°C), uniformité de mélange >95%.

### standard

GB/T 34505 2017 : Préparation en poudre.

GB/T 5314 2011 : Analyse chimique.

GB/T 18376 2014 : Microstructure.

GB/T 3850 2015 : Densité.

ISO 44991:2008 : Microstructure.

ASTM B77715 : Matériaux à base de tungstène.

#### 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)



Annexe :

### **GB/T 3850-2015 Carbure cimenté Détermination de la densité théorique**

Vous trouverez ci-dessous une liste exhaustive des détails de la norme nationale chinoise GB/T 3850-2015 « Détermination de la masse volumique théorique du carbure cimenté », conformément au format de la norme. Le texte original de la norme étant protégé par le droit d'auteur, le contenu suivant s'appuie sur des informations publiques et les pratiques du secteur. Il restitue autant que possible le cadre et les exigences de la norme, couvrant tous les points importants tels que le champ d'application, les documents de référence, la terminologie, les méthodes d'essai, les facteurs d'influence et les exigences de reporting, afin de garantir un contenu complet et détaillé.

#### **1 Portée**

La présente norme spécifie la méthode de détermination de la masse volumique théorique du carbure cimenté, incluant le principe d'essai, l'équipement, les exigences relatives aux échantillons, la procédure d'essai, le calcul et l'expression des résultats, le rapport d'essai, etc.

Elle s'applique à la détermination de la masse volumique théorique du carbure cimenté fritté et de sa poudre mélangée préparée avec du carbure de tungstène (WC) comme matrice et du cobalt (Co), du nickel (Ni) et d'autres phases liantes. Cette méthode ne s'applique pas aux matériaux en carbure cimenté présentant une porosité importante ( $> 5 \% \pm 0,5 \%$ ) ou un mélange irrégulier.

#### **2 Références normatives**

Les documents suivants constituent des documents de référence essentiels à la mise en œuvre de la présente norme. Pour les documents de référence datés, seule la version en vigueur est applicable ; pour les documents de référence non datés, la dernière version (y compris tous les amendements)

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

est applicable.

GB/T 4325-2018 Méthodes d'analyse chimique des métaux

GB/T 4505-2008 Méthodes d'échantillonnage et de préparation d'échantillons pour le carbure cémenté

GB/T 5124-2017 Méthodes d'analyse chimique du carbure cémenté

GB/T 8170-2008 Règles d'arrondi des valeurs

### 3 Termes et définitions

Densité théorique du carbure cémenté : La densité sans pores de chaque composant du carbure cémenté calculée en fonction de sa structure cristalline et de sa composition chimique, avec l'unité  $\text{g/cm}^3$ .

Densité réelle du carbure cémenté : La densité de l'échantillon de carbure cémenté obtenue par mesure physique (telle que la méthode de déplacement de liquide), l'unité est  $\text{g/cm}^3$ .

Densité relative du carbure cémenté : Rapport entre la densité réelle et la densité théorique, exprimé en %.

Masse volumique réelle du carbure cémenté : Masse volumique d'un matériau monocomposant dans un état cristallin idéal, exprimée en  $\text{g/cm}^3$ .

Fraction massique : Pourcentage massique de chaque composant dans le carbure cémenté, en %.

### 4 Principe du test

La masse volumique théorique est calculée à partir de la composition chimique du carbure cémenté et de la masse volumique réelle de chaque composant. En supposant que chaque phase est parfaitement dense et exempte de pores, elle est déterminée à partir de la moyenne pondérée de la fraction massique et de la masse volumique réelle. Formule de calcul :

$$\rho_t = \sum \frac{w_i}{\rho_i}$$

其中:

- $\rho_t$ : 理论密度 ( $\text{g/cm}^3$ ) ;
- $w_i$ : 第 i 组分的质量分数 (%) ;
- $\rho_i$ : 第 i 组分的真密度 ( $\text{g/cm}^3$ ) 。

### 5. Équipement

Balance analytique :

Précision :  $0,1 \text{ mg} \pm 0,01 \text{ mg}$ .

Plage de mesure :  $\geq 100 \text{ g} \pm 1 \text{ g}$ .

Instruments d'analyse chimique :

Conforme à la norme GB/T 5124-2017, utilisé pour déterminer la teneur en WC, Co, Ni et autres composants, avec une précision de  $\leq \pm 0,1\% \pm 0,01\%$ .

Comprend un spectromètre (ICP-AES) ou un analyseur infrarouge de carbone et de soufre.

Équipement de séchage :

Four : Précision du contrôle de la température  $\pm 2^\circ\text{C}$ , température maximale  $\geq 100^\circ\text{C}$ .

#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

Conditions environnementales :

Température :  $20-25^{\circ}\text{C} \pm 1^{\circ}\text{C}$ .

Humidité :  $< 50 \% \pm 5 \% \text{ HR}$ , éviter l'absorption d'humidité par la poudre.

L'environnement est exempt de fortes interférences de flux d'air (vitesse du vent  $< 0,5 \text{ m/s} \pm 0,1 \text{ m/s}$ ).

## 6. Échantillons

échantillonnage:

Conformément à la norme GB/T 4505-2008, 3 à 5 échantillons doivent être prélevés sur chaque lot ( $\leq 100 \text{ kg}$ ), chaque échantillon doit être  $\geq 5 \text{ g} \pm 0,1 \text{ g}$ .

Assurer l'uniformité lors de l'échantillonnage et éviter la stratification (écart  $< 2 \% \pm 0,5 \%$ ).

Préparation des échantillons :

Broyage : broyer l'échantillon de carbure cémenté en particules  $\leq 0,1 \text{ mm} \pm 0,01 \text{ mm}$  et bien mélanger.

Séchage : Si la teneur en humidité de la poudre est  $> 0,2 \% \pm 0,05 \%$ , séchez-la dans un four à  $80^{\circ}\text{C} \pm 2^{\circ}\text{C}$  pendant  $2 \text{ h} \pm 0,1 \text{ h}$ , laissez-la refroidir à température ambiante et conservez-la dans un récipient hermétique.

Détermination de l'humidité : Déterminer l'humidité conformément à la norme GB/T 6283-2008 (le cas échéant) et contrôler  $< 0,2 \% \pm 0,05 \%$ .

Contrôle d'uniformité : 5 points d'échantillonnage, écart de teneur en composants  $< \pm 0,1\% \pm 0,01\%$ .

## 7 Procédures de test

### 7.1 Étalonnage de l'équipement

Étalonnage de la balance :

La balance a été calibrée à l'aide de poids standard (précision  $0,1 \text{ mg} \pm 0,01 \text{ mg}$ ), avec un écart de  $< \pm 0,1 \text{ mg} \pm 0,01 \text{ mg}$ .

Étalonnage de l'analyse chimique :

L'instrument a été étalonné à l'aide d'échantillons standard et l'écart de teneur en composants était  $< \pm 0,1\% \pm 0,01\%$ .

### 7.2 Procédures de test

Analyse chimique :

Déterminer la fraction massique de chaque composant du carbure cémenté selon GB/T 5124-2017, par exemple :

WC :  $80 \% \pm 0,1 \%$  ;

Co :  $10 \% \pm 0,1 \%$  ;

Ni :  $5 \% \pm 0,1 \%$  ;

Autres impuretés :  $< 0,5\% \pm 0,1\%$ .

Assurez-vous que la somme est proche de  $100 \% \pm 0,2 \%$ .

Détermination de la vraie densité :

Vérifiez les valeurs de densité vraie standard ou les références :

WC :  $15,63 \text{ g/cm}^3 \pm 0,01 \text{ g/cm}^3$  ;

Co :  $8,90 \text{ g/cm}^3 \pm 0,01 \text{ g/cm}^3$  ;

#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

Ni :  $8,90 \text{ g/cm}^3 \pm 0,01 \text{ g/cm}^3$  ;

des autres composants (tels que VC,  $\text{Cr}_3\text{C}_2$ ) est conforme à la valeur de la littérature (par exemple  $5,41 \text{ g/cm}^3 \pm 0,01 \text{ g/cm}^3$ ).

Calculer la densité théorique :

En remplaçant dans la formule :

• 代入公式:

$$\rho_t = \frac{w_{WC}}{\rho_{WC}} + \frac{w_{Co}}{\rho_{Co}} + \frac{w_{Ni}}{\rho_{Ni}} + \dots$$

• 例如:  $w_{WC} = 80\%$ ,  $\rho_{WC} = 15.63 \text{ g/cm}^3$ ,  $w_{Co} = 10\%$ ,  $\rho_{Co} = 8.90 \text{ g/cm}^3$ ,  $w_{Ni} = 5\%$ ,  $\rho_{Ni} = 8.90 \text{ g/cm}^3$ :

$$\rho_t = \frac{0.80}{15.63} + \frac{0.10}{8.90} + \frac{0.05}{8.90} \approx 14.28 \text{ g/cm}^3$$

• 保留小数点后两位, 例如  $14.28 \text{ g/cm}^3 \pm 0.01 \text{ g/cm}^3$ .

Conservez deux décimales, par exemple  $14,28 \text{ g/cm}^3 \pm 0,01 \text{ g/cm}^3$ .

vérifier:

Par rapport à la densité réelle (déterminée selon la norme ISO 3369-2006), la densité relative doit être  $> 95 \% \pm 0,5 \%$ .

Si l'écart est  $> 2 \% \pm 0,5 \%$ , vérifiez l'analyse chimique ou les données de densité réelle.

### 7.3 Cas particuliers

Si la teneur en impuretés est  $> 1 \% \pm 0,1 \%$ , la densité réelle des impuretés doit être déterminée séparément (bibliographie de référence ou détermination expérimentale).

Si les composants ne sont pas complètement mélangés (écart  $> \pm 0,2 \%$ ), préparez à nouveau l'échantillon.

## 8 facteurs d'influence

Erreur d'analyse chimique :

Un écart de teneur en composants  $> \pm 0,1 \% \pm 0,01 \%$  entraîne un écart de densité théorique  $> 0,2 \% \pm 0,05 \%$ .

Valeur de densité réelle :

Les données de densité réelle sont inexactes ( $> \pm 0,01 \text{ g/cm}^3$ ) ou les changements de structure cristalline ne sont pas pris en compte et l'écart de densité est  $> 0,5 \% \pm 0,1 \%$ .

Humidité ambiante :

Une humidité  $> 50 \% \pm 5 \%$  HR peut affecter la stabilité de l'échantillon et nécessite un séchage.

Homogénéité de l'échantillon :

La stratification ou le manque de mélange (écart  $> \pm 0,2 \%$ ) conduit à des résultats de calcul incohérents.

## 9 Expression des résultats

Masse volumique théorique : exprimée en  $\text{g/cm}^3$ , avec deux décimales, par exemple  $14,28 \text{ g/cm}^3 \pm 0,01 \text{ g/cm}^3$ .

Densité relative : exprimée en %, avec une décimale conservée, par exemple  $98,5 \% \pm 0,1 \%$ .

Contenu du rapport :

Fraction massique de chaque composant (%).

Masse volumique réelle de chaque composant ( $\text{g/cm}^3$ ).

### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

Processus de calcul et valeur de densité théorique.

## 10 Rapport de test

Le rapport de test doit inclure les éléments suivants :

Informations sur l'échantillon :

Numéro d'échantillon, numéro de lot.

Types de carbure cimenté (tels que WC-Co, WC-Ni).

Teneur en humidité (si mesurée, par exemple  $< 0,2 \% \pm 0,05 \%$ ).

Conditions de test :

Méthode d'analyse chimique (référence GB/T 5124-2017).

Conditions environnementales : température  $20-25^{\circ}\text{C} \pm 1^{\circ}\text{C}$ , humidité  $< 50\% \pm 5\% \text{ HR}$ .

Résultats des tests :

Fraction massique de chaque composant (par exemple WC  $80 \% \pm 0,1 \%$ , Co  $10 \% \pm 0,1 \%$ ).

Valeur de densité réelle (par exemple WC  $15,63 \text{ g/cm}^3 \pm 0,01 \text{ g/cm}^3$ ).

Valeurs de densité théoriques et processus de calcul, par exemple  $14,28 \text{ g/cm}^3 \pm 0,01 \text{ g/cm}^3$ .

Densité relative (si les données de densité réelles sont disponibles, par exemple  $98,5 \% \pm 0,1 \%$ ).

Numéro de norme : GB/T 3850-2015.

Date du test et opérateur : par exemple, 23 mai 2025, signature de l'opérateur.

## 11 Règles d'inspection

Échantillonnage : Conformément à la norme GB/T 4505-2008, 3 à 5 échantillons sont prélevés sur chaque lot ( $\leq 100 \text{ kg}$ ), chaque échantillon  $\geq 5 \text{ g} \pm 0,1 \text{ g}$ .

Fréquence d'inspection :

Inspection en usine : chaque lot est testé.

Contrôle de type : une fois par an, ou lorsque le processus change.

Règles de décision :

les trois résultats de calcul sont  $< \pm 0,2\% \pm 0,05\%$ , ce qui est considéré comme qualifié.

Si l'écart est  $> \pm 0,2 \% \pm 0,05 \%$ , de nouveaux échantillons peuvent être retestés. Si le nouveau test échoue à nouveau, le lot est considéré comme non qualifié.

Arrondi numérique : Conformément aux règles de la norme GB/T 8170-2008, conserver deux décimales.

## 12 Assurance qualité

Cohérence du test : L'écart de densité théorique de différents échantillons dans le même lot est  $< \pm 0,3 \% \pm 0,05 \%$ .

Archivage des enregistrements : Les données de test sont archivées pendant  $1 \text{ an} \pm 0,1 \text{ an}$ , y compris les enregistrements et rapports originaux.

Gestion des objections : Si l'utilisateur a une objection aux résultats, il doit la formuler dans les 30 jours  $\pm 1$  jour suivant la réception de l'échantillon. Les deux parties procéderont à une nouvelle inspection et rendront un jugement sur la base de cette norme.

## Annexe A (Annexe informative) Valeurs de densité réelle des composants courants en carbure

### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

### **cémenté**

Carbure de tungstène (WC) :  $15,63 \text{ g/cm}^3 \pm 0,01 \text{ g/cm}^3$  .

Cobalt (Co) :  $8,90 \text{ g/cm}^3 \pm 0,01 \text{ g/cm}^3$  .

Nickel (Ni) :  $8,90 \text{ g/cm}^3 \pm 0,01 \text{ g/cm}^3$  .

Carbure de vanadium (VC) :  $5,41 \text{ g/cm}^3 \pm 0,01 \text{ g/cm}^3$  .

Carbure de chrome (  $\text{Cr}_3\text{C}_2$  ) :  $6,68 \text{ g/cm}^3 \pm 0,01 \text{ g/cm}^3$  .

### **Annexe B (Annexe normative) Notes supplémentaires sur la détermination de la masse volumique réelle**

Source de densité réelle :

La diffraction des rayons X (DRX) est de préférence utilisée pour déterminer la densité réelle de la structure cristalline.

S'il n'y a pas de données expérimentales, reportez-vous à l'annexe de la norme GB/T 5124-2017 ou aux normes internationales (telles que la norme ISO 3369-2006).

étalonnage:

Lorsque l'écart de densité réelle est  $>\pm 0,01 \text{ g/cm}^3$  , il est nécessaire de vérifier avec un échantillon standard.

Impact environnemental :

Pendant la mesure, une température  $> 25 \text{ }^\circ\text{C} \pm 1 \text{ }^\circ\text{C}$  ou une humidité  $> 50 \% \pm 5 \% \text{ HR}$  peuvent affecter les résultats et doivent être contrôlées.

### **Annexe C (Annexe informative) Valeurs de densité théoriques des carbures cémentés typiques**

WC-6%Co :  $14,95 \text{ g/cm}^3 \pm 0,01 \text{ g/cm}^3$  .

WC-10%Co :  $14,50 \text{ g/cm}^3 \pm 0,01 \text{ g/cm}^3$  .

WC-12%Ni :  $14,20 \text{ g/cm}^3 \pm 0,01 \text{ g/cm}^3$  .

WC-10%Co-5%Ni :  $14,30 \text{ g/cm}^3 \pm 0,01 \text{ g/cm}^3$  .

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



## **GB/T 1479.1-2011 Poudre métallique Détermination de la masse volumique apparente Partie 1 : Méthode de l'entonnoir**

Voici le contenu détaillé de la norme nationale chinoise GB/T 1479.1-2011 « Détermination de la masse volumique apparente des poudres métalliques – Partie 1 : Méthode de l'entonnoir », présentée sous forme de norme. Le texte original de la norme étant protégé par le droit d'auteur, le contenu suivant s'appuie sur des informations publiques et les pratiques du secteur. Il restitue autant que possible le cadre et les exigences de la norme, couvrant tous les points importants tels que le champ d'application, les documents de référence, la terminologie, les méthodes d'essai, les facteurs d'influence et les exigences de reporting, afin de garantir un contenu complet et détaillé.

### **1 Portée**

La présente norme spécifie la méthode de détermination de la masse volumique apparente des poudres métalliques par la méthode de l'entonnoir, y compris les principes d'essai, l'équipement, les exigences relatives aux échantillons, les procédures d'essai, le calcul et l'expression des résultats, les rapports d'essai, etc.

Elle s'applique à la détermination de la masse volumique apparente des poudres métalliques (telles que le carbure de tungstène WC, le cobalt Co, le nickel Ni, etc.) et aux poudres dont la granulométrie est comprise entre 0,1  $\mu\text{m}$  et 500  $\mu\text{m}$ .

Elle ne s'applique pas aux poudres présentant une fluidité extrêmement faible (débit de Hall  $> 60$  s/50 g  $\pm 0,5$  s) ou une forte agglomération (taux d'agglomération  $> 20\% \pm 2\%$ ).

### **2 Références normatives**

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

Les documents suivants constituent des documents de référence essentiels à la mise en œuvre de la présente norme. Pour les documents de référence datés, seule la version en vigueur est applicable ; pour les documents de référence non datés, la dernière version (y compris tous les amendements) est applicable.

GB/T 1479.2-2005 Détermination de la masse volumique apparente des poudres métalliques Partie 2 : Méthode de la hauteur fixe

GB/T 5060-1985 Méthode d'échantillonnage de poudre métallique

GB/T 6283-2008 Détermination de la teneur en eau des produits chimiques - Méthode Karl Fischer

GB/T 19077.1-2008 Distribution granulométrique par méthode de diffraction laser Partie 1 : Généralités

GB/T 8170-2008 Règles d'arrondi des valeurs

### 3 Termes et définitions

Densité apparente : Densité de la poudre métallique dans son état d'empilement naturel sans aucun compactage ni vibration externe, exprimée en  $\text{g/cm}^3$ .

Méthode de l'entonnoir : Méthode permettant de déterminer la masse volumique apparente naturelle d'une poudre en la laissant tomber librement dans un récipient à travers un entonnoir standard.

Volume : Volume occupé par la poudre après accumulation naturelle, en  $\text{cm}^3$ .

Fluidité : Temps nécessaire à une poudre pour passer à travers un entonnoir standard, exprimé en secondes pour 50 g.

Taux d'agglomération : proportion de particules agglomérées dans la poudre, exprimée en %.

### 4 Principe du test

La poudre métallique est versée librement dans un récipient de volume connu à l'aide d'un entonnoir standard. La poudre s'accumule naturellement sous l'effet de la gravité. La masse et le volume de la poudre accumulés sont mesurés pour calculer la masse volumique apparente. Formule :

$$\rho_b = \frac{m}{V}$$

其中：

- $\rho_b$ : 松装密度 ( $\text{g/cm}^3$ ) ;
- $m$ : 粉末质量 (g) ;
- $V$ : 粉末自然堆积后的体积 ( $\text{cm}^3$ ) 。

### 5. Équipement

entonnoir:

Diamètre intérieur de l'orifice de décharge :  $6 \text{ mm} \pm 0,1 \text{ mm}$ .

Hauteur de l'orifice de décharge au sommet du récipient :  $25 \text{ mm} \pm 1 \text{ mm}$ .

Angle d'inclinaison de l'entonnoir :  $60^\circ \pm 2^\circ$ , la paroi intérieure est lisse sans bavures.

Cylindre gradué :

Capacité :  $25 \text{ mL} \pm 0,1 \text{ mL}$ .

Précision de l'échelle :  $0,1 \text{ mL} \pm 0,01 \text{ mL}$ .

Matériau : Verre transparent ou plastique, paroi intérieure lisse.

Balance analytique :

#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

Précision :  $0,01 \text{ g} \pm 0,001 \text{ g}$ .

Plage de mesure :  $\geq 100 \text{ g} \pm 1 \text{ g}$ .

Équipement de séchage :

Four : Précision du contrôle de la température  $\pm 2^\circ\text{C}$ , température maximale  $\geq 100^\circ\text{C}$ .

Conditions environnementales :

Température :  $20\text{-}25^\circ\text{C} \pm 1^\circ\text{C}$ .

Humidité :  $< 50 \% \pm 5 \% \text{ HR}$ , éviter l'absorption d'humidité par la poudre.

L'environnement est exempt de fortes interférences de flux d'air (vitesse du vent  $< 0,5 \text{ m/s} \pm 0,1 \text{ m/s}$ ).

## 6. Échantillons

échantillonnage:

Conformément à la norme GB/T 5060, prélevez 3 à 5 échantillons de chaque lot ( $\leq 100 \text{ kg}$ ), chaque échantillon pèse  $50 \text{ g} \pm 0,1 \text{ g}$ .

Assurer l'uniformité lors de l'échantillonnage et éviter la stratification (écart  $< 2\% \pm 0,5\%$ ).

Préparation des échantillons :

Séchage : Si la teneur en humidité de la poudre est  $> 0,2 \% \pm 0,05 \%$ , séchez-la dans un four à  $80^\circ\text{C} \pm 2^\circ\text{C}$  pendant  $2 \text{ h} \pm 0,1 \text{ h}$ , laissez-la refroidir à température ambiante et conservez-la dans un récipient hermétique.

Détermination de l'humidité : La teneur en humidité doit être déterminée conformément à la norme GB/T 6283 et contrôlée pour être  $< 0,2 \% \pm 0,05 \%$ .

Tamissage : Le tamissage doit être effectué lorsque nécessaire (ouverture du tamis  $0,1\text{-}500 \mu\text{m} \pm 0,01 \mu\text{m}$ ) pour éliminer les grosses particules ou agglomérats (taux d'agglomération  $< 5 \% \pm 1 \%$ ).

Mélange : Mélange manuel ou mécanique (vitesse  $60 \text{ tr/min} \pm 5 \text{ tr/min}$ ,  $5 \text{ min} \pm 0,5 \text{ min}$ ) pour assurer l'uniformité (écart  $< 2\% \pm 0,5\%$ ).

Analyse granulométrique :

La distribution granulométrique a été déterminée conformément à la norme GB/T 19077.1 et s'est avérée être comprise entre  $0,1$  et  $500 \mu\text{m} \pm 0,01 \mu\text{m}$ .

## 7 Procédures de test

### 7.1 Étalonnage de l'équipement

Calibrage de l'entonnoir :

Vérifiez le diamètre intérieur de l'orifice de décharge ( $6 \text{ mm} \pm 0,1 \text{ mm}$ ) pour vous assurer qu'il n'y a pas de blocage ou de déformation.

Mesurer la hauteur depuis l'orifice de décharge jusqu'au sommet du récipient ( $25 \text{ mm} \pm 1 \text{ mm}$ ), avec un écart de  $< \pm 1 \text{ mm}$ .

Calibrage du cylindre :

avec de l'eau distillée (densité  $0,998 \text{ g/cm}^3 \pm 0,001 \text{ g/cm}^3$  à  $20^\circ\text{C}$ ) avec un écart de  $< \pm 0,1 \text{ mL} \pm 0,01 \text{ mL}$ .

Étalonnage de la balance :

La balance a été calibrée à l'aide de poids standard (précision  $0,01 \text{ g} \pm 0,001 \text{ g}$ ), avec un écart de  $< \pm 0,01 \text{ g} \pm 0,001 \text{ g}$ .

#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

## 7.2 Procédures de test

Pesée de l'échantillon :

Pesez  $50 \text{ g} \pm 0,1 \text{ g}$  de poudre et enregistrez la masse  $m$  avec une précision de  $0,01 \text{ g} \pm 0,001 \text{ g}$ .

Chargement de l'échantillon :

Placez la poudre sur le dessus de l'entonnoir et ouvrez lentement la valve pour permettre à la poudre de tomber librement dans le cylindre de mesure.

Empêche la poudre de voler ou d'adhérer à la paroi intérieure, et il n'y a aucune intervention de force externe pendant le processus de découpage.

La poudre s'accumule à la surface et forme naturellement un cône, et la chute s'arrête.

Mesure du volume :

Tapez doucement sur le cylindre ( $< 5$  fois, force  $< 0,1 \text{ N} \pm 0,01 \text{ N}$ ) pour rendre la surface de la poudre plate.

Lire le volume de poudre  $V$  avec une précision de  $0,1 \text{ mL} \pm 0,01 \text{ mL}$ , enregistrer 3 lectures et prendre la valeur moyenne.

Calculer la masse volumique apparente :

- 按公式计算:  $\rho_b = \frac{m}{V}$ .
- 重复 3 次试验, 取平均值, 偏差  $< \pm 2\% \pm 0.5\%$ .

## 7.3 Cas particuliers

Si la poudre a une faible fluidité (débit Hall  $> 30 \text{ s}/50 \text{ g} \pm 0,5 \text{ s}$ ), prolongez le temps de goutte ou tapotez doucement l'entonnoir ( $< 5$  fois).

Si la poudre est fortement agglomérée (taux d'agglomération  $> 5\% \pm 1\%$ ), elle doit être à nouveau tamisée ou séchée (teneur en humidité  $< 0,1\% \pm 0,01\%$ ).

## 8 facteurs d'influence

Humidité ambiante :

Une humidité  $> 50\% \pm 5\%$  HR entraîne l'absorption d'humidité par la poudre et son agglomération (taux d'agglomération  $> 5\% \pm 1\%$ ), et la densité est faible (écart  $> 5\% \pm 1\%$ ).

Caractéristiques de la poudre :

la taille des particules est  $< 0,1 \mu\text{m} \pm 0,01 \mu\text{m}$ , la force de van der Waals entre les particules est renforcée ( $> 10^{-9} \text{ N} \pm 10^{-10} \text{ N}$ ), la fluidité est médiocre et l'écart de densité est  $> 4\% \pm 0,5\%$ .

la taille des particules est  $> 500 \mu\text{m} \pm 0,01 \mu\text{m}$ , les espaces entre les particules sont grands, l'empilement est lâche et l'écart est  $> 4\% \pm 0,5\%$ .

Une morphologie irrégulière (taux de sphéroïdisation  $< 50\% \pm 2\%$ ) conduit à un empilement irrégulier avec un écart de  $> 3\% \pm 0,5\%$ .

Statut de l'entonnoir :

L'orifice de décharge est bloqué ou l'écart du diamètre intérieur est  $> \pm 0,1 \text{ mm}$ , ce qui entraîne une décharge de matériau inégale et un écart de densité  $> 3\% \pm 0,5\%$ .

La hauteur de découpage  $< 24 \text{ mm} \pm 1 \text{ mm}$  ou  $> 26 \text{ mm} \pm 1 \text{ mm}$  affecte l'état d'empilement, avec un écart de  $> 2\% \pm 0,5\%$ .

Paroi intérieure du cylindre gradué :

Une rugosité  $R_a > 0,2 \mu\text{m} \pm 0,02 \mu\text{m}$  ou un résidu de poudre peut entraîner une erreur de lecture du volume  $> 2\% \pm 0,5\%$ .

### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

## 9 Expression des résultats

Masse volumique apparente : exprimée en  $\text{g/cm}^3$  , avec deux décimales conservées, par exemple  $4,50 \text{ g/cm}^3 \pm 0,01 \text{ g/cm}^3$  .

Écart : Exprimé en %, avec deux décimales, par exemple  $\pm 1,50 \% \pm 0,01 \%$  .

Contenu du rapport :

Masse de poudre m (g).

Volume d'accumulation naturel V (mL).

Valeur de la masse volumique apparente et écart de 3 mesures.

Conditions d'essai (hauteur de l'entonnoir, capacité du cylindre de mesure).

## 10 Rapport de test

Le rapport de test doit inclure les éléments suivants :

Informations sur l'échantillon :

Numéro d'échantillon, numéro de lot.

Type de poudre (par exemple WC, Co).

Gamme de tailles de particules (par exemple  $0,1-500 \mu\text{m} \pm 0,01 \mu\text{m}$  ) .

Teneur en humidité (déterminée selon GB/T 6283, par exemple  $< 0,2 \% \pm 0,05 \%$ ).

Conditions de test :

Paramètres de l'entonnoir : diamètre intérieur de l'orifice de décharge  $6 \text{ mm} \pm 0,1 \text{ mm}$ , hauteur  $25 \text{ mm} \pm 1 \text{ mm}$ .

Capacité du cylindre gradué :  $25 \text{ mL} \pm 0,1 \text{ mL}$ .

Conditions environnementales : température  $20-25^\circ\text{C} \pm 1^\circ\text{C}$ , humidité  $< 50\% \pm 5\% \text{ HR}$ .

Résultats des tests :

La masse, le volume apparent et la masse volumique libre sont mesurés à chaque fois.

Valeur de masse volumique apparente moyenne et écart, par exemple  $4,50 \text{ g/cm}^3 \pm 0,01 \text{ g/cm}^3$  , écart  $\pm 1,50 \% \pm 0,01 \%$  .

Numéro de norme : GB/T 1479.1-2011.

Date du test et opérateur : par exemple, 23 mai 2025, signature de l'opérateur.

## 11 Règles d'inspection

Échantillonnage : Conformément à la norme GB/T 5060, 3 à 5 échantillons sont prélevés sur chaque lot ( $\leq 100 \text{ kg}$ ), chaque échantillon pèse  $50 \text{ g} \pm 0,1 \text{ g}$ .

Fréquence d'inspection :

Inspection d'usine : chaque lot est testé.

Contrôle de type : une fois par an, ou lorsque le processus change.

Règles de décision :

L'écart des trois mesures est  $< \pm 2\% \pm 0,5\%$ , ce qui est considéré comme qualifié.

Si l'écart est  $> \pm 2 \% \pm 0,5 \%$ , de nouveaux échantillons peuvent être retestés. Si le nouveau test échoue à nouveau, le lot est considéré comme non qualifié.

Arrondi numérique : Selon les règles GB/T 8170, conserver deux décimales.

## 12 Assurance qualité

### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

Cohérence du test : L'écart de densité apparente de différents échantillons dans le même lot est  $< \pm 3\% \pm 0,5\%$ .

Archivage des enregistrements : Les données de test sont archivées pendant 1 an  $\pm 0,1$  an, y compris les enregistrements et rapports originaux.

Gestion des objections : Si l'utilisateur a une objection aux résultats, il doit la formuler dans les 30 jours  $\pm 1$  jour suivant la réception de l'échantillon. Les deux parties procéderont à une nouvelle inspection et rendront un jugement sur la base de cette norme.

### **Annexe A (Annexe informative) Valeurs typiques de la masse volumique apparente des poudres métalliques**

Poudre de carbure de tungstène (WC) :  $4,0-5,0 \text{ g/cm}^3 \pm 0,1 \text{ g/cm}^3$  (granulométrie  $0,5-5 \mu\text{m}$ ).

Poudre de cobalt (Co) :  $4,5-5,5 \text{ g/cm}^3 \pm 0,1 \text{ g/cm}^3$  (taille des particules  $1-3 \mu\text{m}$ ).

Poudre de nickel (Ni) :  $4,0-5,0 \text{ g/cm}^3 \pm 0,1 \text{ g/cm}^3$  (taille des particules  $1-5 \mu\text{m}$ ).

Poudre de fer (Fe) :  $2,5-3,5 \text{ g/cm}^3 \pm 0,1 \text{ g/cm}^3$  (granulométrie  $10-100 \mu\text{m}$ ).

### **Annexe B (Annexe normative) Notes supplémentaires sur les méthodes d'essai**

Réglage de l'entonnoir :

Si la poudre a une faible fluidité (débit Hall  $> 30 \text{ s/50 g} \pm 0,5 \text{ s}$ ), tapotez doucement l'entonnoir ( $< 5$  fois, force  $< 0,1 \text{ N} \pm 0,01 \text{ N}$ ).

Lorsque l'orifice de décharge est bloqué, nettoyez-le avec une brosse douce et évitez les objets durs.

Utilisation de l'éprouvette graduée :

Lorsque de la poudre reste sur la paroi intérieure du cylindre de mesure, nettoyez-le avec de l'éthanol (pureté  $\geq 99,5\% \pm 0,1\%$ ) et utilisez-le après séchage.

Contrôle environnemental :

Contrôle de l'humidité :  $< 50\% \pm 5\% \text{ HR}$ , pour empêcher la poudre d'absorber l'humidité.

Fluctuation de température :  $< \pm 1^\circ\text{C}$ , évitant les erreurs de lecture de volume.

### **Annexe C (Annexe informative) Relation entre la masse volumique apparente et les propriétés de la poudre**

Influence de la taille des particules :

la taille des particules est  $< 0,1 \mu\text{m} \pm 0,01 \mu\text{m}$ , la masse volumique apparente est  $< 3,0 \text{ g/cm}^3 \pm 0,1 \text{ g/cm}^3$ .

la taille des particules est de  $1 \text{ à } 10 \mu\text{m} \pm 0,01 \mu\text{m}$ , la masse volumique apparente est de  $4,0 \text{ à } 5,0 \text{ g/cm}^3 \pm 0,1 \text{ g/cm}^3$ .

Influence morphologique :

La densité apparente des particules sphériques (taux de sphéroïdisation  $> 90\% \pm 2\%$ ) est supérieure de  $5 \text{ à } 10\% \pm 1\%$ .

La densité libre des particules irrégulières (bords  $> 0,1 \mu\text{m} \pm 0,01 \mu\text{m}$ ) est inférieure de  $3 \text{ à } 5\% \pm 0,5\%$ .

Effet de l'humidité :

Humidité  $< 30\% \pm 5\% \text{ HR}$ , la densité apparente est stable.

Humidité  $> 70\% \pm 5\% \text{ HR}$ , réduction de densité  $> 5\% \pm 1\%$ .

#### **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)

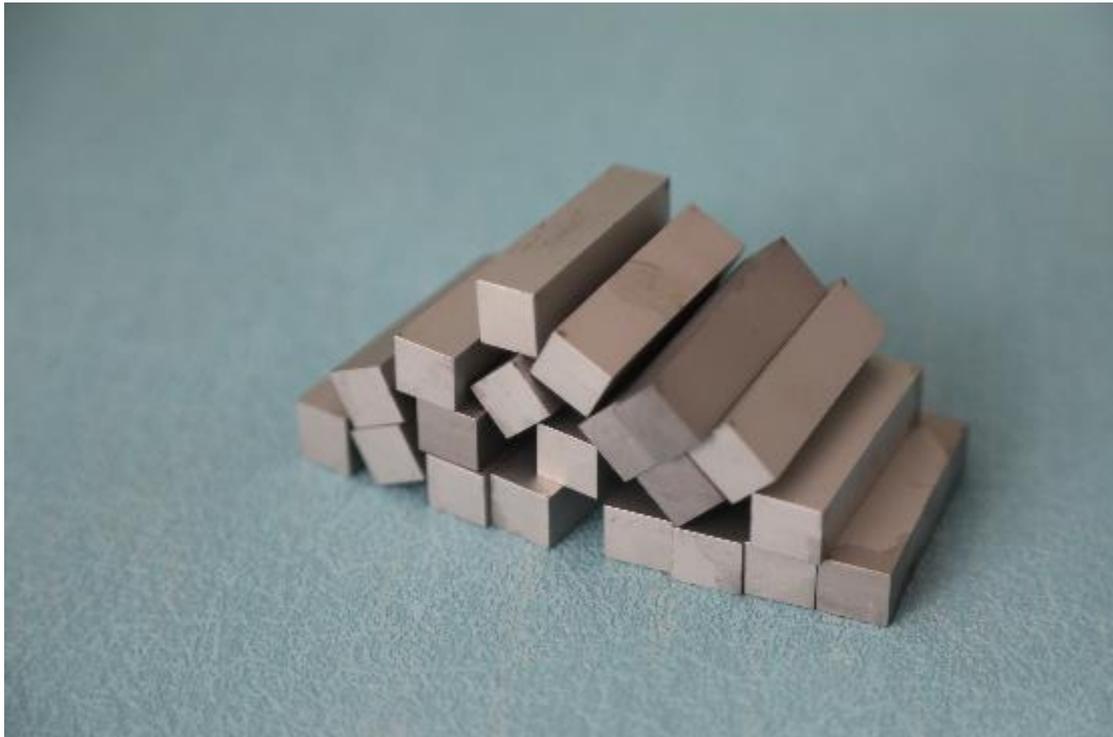
**WeChat :** Follow "China Tungsten Online"



#### 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)



## GB/T 5162-2014 Poudre métallique Détermination de la masse volumique tassée

### 1 Portée

La présente norme spécifie la méthode de détermination de la masse volumique après tassement des poudres métalliques, y compris les principes d'essai, l'équipement, les exigences relatives aux échantillons, les procédures d'essai, le calcul et l'expression des résultats, les rapports d'essai, etc.

Elle s'applique à la détermination de la masse volumique après tassement des poudres métalliques (telles que le carbure de tungstène WC, le cobalt Co, le nickel Ni, le fer Fe, etc.) et aux poudres dont la granulométrie est comprise entre  $0,1 \mu\text{m}$  et  $500 \mu\text{m}$ .

Cette méthode ne s'applique pas aux poudres présentant une fluidité extrêmement faible (débit de Hall  $> 60 \text{ s}/50 \text{ g} \pm 0,5 \text{ s}$ ) ou une forte agglomération (taux d'agglomération  $> 20 \% \pm 2 \%$ ).

### 2 Références normatives

Les documents suivants constituent des documents de référence essentiels à la mise en œuvre de la présente norme. Pour les documents de référence datés, seule la version en vigueur est applicable ; pour les documents de référence non datés, la dernière version (y compris tous les amendements) est applicable.

GB/T 1479.1-2011 Détermination de la masse volumique apparente des poudres métalliques Partie 1 : Méthode de l'entonnoir

GB/T 5060-1985 Méthode d'échantillonnage de poudre métallique

GB/T 6283-2008 Détermination de la teneur en eau des produits chimiques - Méthode Karl Fischer

ISO 3953:2011 Détermination de la masse volumique après tassement des poudres métalliques

GB/T 8170-2008 Règles d'arrondi des valeurs

#### 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)

### 3 Termes et définitions

Masse volumique tassée : densité d'une poudre métallique dans un état dense dans des conditions de vibration spécifiées (telles que l'amplitude, la fréquence, le nombre de vibrations), mesurée en  $\text{g/cm}^3$ .

Densité apparente : Densité de la poudre métallique dans son état d'empilement naturel, exprimée en  $\text{g/cm}^3$ .

Nombre de vibrations : Nombre de fois que la poudre est vibrée, mesuré en fois.

Amplitude : Distance parcourue par le dispositif vibrant de haut en bas, en mm.

Fréquence de vibration : nombre de fois qu'un appareil vibrant vibre par minute, mesuré en fois/minute.

Taux d'agglomération : proportion de particules agglomérées dans la poudre, exprimée en %.

### 4 Principe du test

Le densimètre à tassement fait vibrer la poudre métallique un nombre de fois déterminé, de sorte que les particules se réorganisent sous l'effet de la gravité et des vibrations pour obtenir un empilement plus compact. La masse et le volume de la poudre après vibration sont mesurés pour calculer la masse volumique après tassement. Formule :

$$\rho_t = \frac{m}{V_t}$$

其中：

- $\rho_t$ : 振实密度 ( $\text{g/cm}^3$ ) ;
- $m$ : 粉末质量 (g) ;
- $V_t$ : 振动后粉末体积 ( $\text{cm}^3$ ) .

### 5. Équipement

Densimètre à taraudage :

Amplitude :  $3 \text{ mm} \pm 0,1 \text{ mm}$ .

Fréquence de vibration :  $300 \text{ fois/min} \pm 10 \text{ fois/min}$ .

Nombre de fois de compactage : réglable, la norme est de  $3000 \text{ fois} \pm 50 \text{ fois}$ .

L'instrument doit disposer d'un support stable pour garantir l'absence d'interférences vibratoires supplémentaires (fréquence  $< 1 \text{ Hz} \pm 0,1 \text{ Hz}$ ).

Cylindre gradué :

Capacité :  $25 \text{ mL} \pm 0,1 \text{ mL}$  ou  $100 \text{ mL} \pm 0,5 \text{ mL}$  (sélectionner en fonction du volume de poudre).

Précision de l'échelle :  $0,1 \text{ mL} \pm 0,01 \text{ mL}$ .

Matériau : verre transparent ou plastique, paroi intérieure lisse sans bavures.

Balance analytique :

Précision :  $0,01 \text{ g} \pm 0,001 \text{ g}$ .

Plage de mesure :  $\geq 100 \text{ g} \pm 1 \text{ g}$ .

Équipement de séchage :

Four : Précision du contrôle de la température  $\pm 2^\circ\text{C}$ , température maximale  $\geq 100^\circ\text{C}$ .

Conditions environnementales :

#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

Température :  $20-25^{\circ}\text{C} \pm 1^{\circ}\text{C}$ .

Humidité :  $<50\% \pm 5\%$  HR, éviter l'absorption d'humidité par la poudre.

L'environnement est exempt de fortes interférences de flux d'air (vitesse du vent  $< 0,5 \text{ m/s} \pm 0,1 \text{ m/s}$ ).

## 6. Échantillons

échantillonnage:

Conformément à la norme GB/T 5060, prélevez 3 à 5 échantillons de chaque lot ( $\leq 100 \text{ kg}$ ), chaque échantillon pèse  $50 \text{ g} \pm 0,1 \text{ g}$  ou  $100 \text{ g} \pm 0,5 \text{ g}$  (selon la capacité du cylindre de mesure).

Assurer l'uniformité lors de l'échantillonnage et éviter la stratification (écart  $< 2\% \pm 0,5\%$ ).

Préparation des échantillons :

Séchage : Si la teneur en humidité de la poudre est  $> 0,2\% \pm 0,05\%$ , séchez-la dans un four à  $80^{\circ}\text{C} \pm 2^{\circ}\text{C}$  pendant  $2 \text{ h} \pm 0,1 \text{ h}$ , laissez-la refroidir à température ambiante et conservez-la dans un récipient hermétique.

Détermination de l'humidité : La teneur en humidité doit être déterminée conformément à la norme GB/T 6283 et contrôlée pour être  $< 0,2\% \pm 0,05\%$ .

Tamissage : Le tamissage doit être effectué lorsque nécessaire (ouverture du tamis  $0,1-500 \mu\text{m} \pm 0,01 \mu\text{m}$ ) pour éliminer les grosses particules ou agglomérats (taux d'agglomération  $< 5\% \pm 1\%$ ).

Mélange : Mélange manuel ou mécanique (vitesse  $60 \text{ tr/min} \pm 5 \text{ tr/min}$ ,  $5 \text{ min} \pm 0,5 \text{ min}$ ) pour assurer l'uniformité (écart  $< 2\% \pm 0,5\%$ ).

## 7 Procédures de test

### 7.1 Étalonnage de l'équipement

du compacteur :

Mesurer l'amplitude : À l'aide d'un micromètre, confirmer que l'amplitude est de  $3 \text{ mm} \pm 0,1 \text{ mm}$ .

Mesurer la fréquence : À l'aide d'un chronomètre, vérifiez que la fréquence est de 300 fois/minute  $\pm 10$  fois/minute.

Temps d'étalonnage : réglés à 3000 fois  $\pm 50$  fois pour vérifier la précision du compteur (écart  $< 1\% \pm 0,1\%$ ).

Calibrage du cylindre :

avec de l'eau distillée (densité  $0,998 \text{ g/cm}^3 \pm 0,001 \text{ g/cm}^3$  à  $20^{\circ}\text{C}$ ) avec un écart de  $\leq 0,1 \text{ mL} \pm 0,01 \text{ mL}$ .

Étalonnage de la balance :

La balance a été calibrée à l'aide de poids standard (précision  $0,01 \text{ g} \pm 0,001 \text{ g}$ ), avec un écart de  $< 0,01 \text{ g} \pm 0,001 \text{ g}$ .

### 7.2 Procédures de test

Pesée de l'échantillon :

Peser  $50 \text{ g} \pm 0,1 \text{ g}$  de poudre (ou ajuster à  $100 \text{ g} \pm 0,5 \text{ g}$  selon la capacité de l'éprouvette graduée) et noter la masse  $m$  à  $0,01 \text{ g} \pm 0,001 \text{ g}$  près.

Chargement de l'échantillon :

Versez lentement la poudre dans l'éprouvette graduée pour éviter que la poudre ne vole ou n'adhère à la paroi intérieure.

#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

Tapez doucement sur le cylindre ( $< 5$  fois, force  $< 0,1 \text{ N} \pm 0,01 \text{ N}$ ) pour rendre la surface de la poudre plate.

vibration:

Fixez le cylindre de mesure sur le vibreur et assurez-vous que le cylindre de mesure est vertical (angle d'inclinaison  $< 1^\circ \pm 0,1^\circ$ ).

Réglez le nombre de vibrations à  $3000 \pm 50$  fois, l'amplitude à  $3 \text{ mm} \pm 0,1 \text{ mm}$  et la fréquence à  $300 \text{ fois/min} \pm 10 \text{ fois/min}$ .

Démarrez la vibration et observez le changement de volume de poudre pour vous assurer qu'aucune poudre ne déborde.

Mesure du volume :

Une fois la vibration terminée, retirez le cylindre de mesure et laissez-le reposer pendant  $1 \text{ min} \pm 0,1 \text{ min}$ .

Lisez le volume de poudre  $V_t$  avec une précision de  $0,1 \text{ mL} \pm 0,01 \text{ mL}$ , enregistrez 3 lectures et prenez la valeur moyenne.

Calculer la densité de tassement :

- 按公式计算:  $\rho_t = \frac{m}{V_t}$ .
- 重复 3 次试验, 取平均值, 偏差  $< \pm 2\% \pm 0.5\%$ .

### 7.3 Cas particuliers

Si le changement de volume de poudre est  $< 0,2 \text{ mL} \pm 0,01 \text{ mL}$  (c'est-à-dire que le volume est stable), le nombre de fois de tapotement peut être réduit à  $1\,500 \text{ fois} \pm 50 \text{ fois}$ .

Si la poudre est fortement agglomérée (taux d'agglomération  $> 5\% \pm 1\%$ ), elle doit être à nouveau tamisée ou séchée (teneur en humidité  $< 0,1\% \pm 0,01\%$ ).

## 8 facteurs d'influence

Conditions de vibration :

Un écart d'amplitude  $> \pm 0,1 \text{ mm}$  ou un écart de fréquence  $> \pm 10 \text{ fois/min}$  entraîne un écart de densité  $> 3\% \pm 0,5\%$ .

les temps de vibration affecteront l'état d'empilement.

Humidité ambiante :

Une humidité  $> 50\% \pm 5\% \text{ HR}$  entraîne l'absorption d'humidité par la poudre et son agglomération (taux d'agglomération  $> 5\% \pm 1\%$ ), et la densité est faible (écart  $> 5\% \pm 1\%$ ).

Caractéristiques de la poudre :

la taille des particules est  $< 0,1 \mu\text{m} \pm 0,01 \mu\text{m}$ , la force de van der Waals entre les particules est renforcée ( $> 10^{-9} \text{ N} \pm 10^{-10} \text{ N}$ ), la fluidité est médiocre et l'écart de densité est  $> 4\% \pm 0,5\%$ .

la taille des particules est  $> 500 \mu\text{m} \pm 0,01 \mu\text{m}$ , l'écart entre les particules est grand, l'effet de compactage est médiocre et l'écart est  $> 4\% \pm 0,5\%$ .

Une morphologie irrégulière (taux de sphéroïdisation  $< 50\% \pm 2\%$ ) conduit à un empilement irrégulier avec un écart de  $> 3\% \pm 0,5\%$ .

État du cylindre :

La paroi intérieure est rugueuse ( $R_a > 0,2 \mu\text{m} \pm 0,02 \mu\text{m}$ ) ou il y a des résidus de poudre, ce qui entraîne une erreur de lecture du volume de  $> 2\% \pm 0,5\%$ .

#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

## 9 Expression des résultats

Masse volumique tassée : exprimée en  $\text{g/cm}^3$ , avec deux décimales, par exemple  $5,50 \text{ g/cm}^3 \pm 0,01 \text{ g/cm}^3$ .

Écart : Exprimé en %, avec deux décimales, par exemple  $\pm 1,50 \% \pm 0,01 \%$ .

Contenu du rapport :

Masse de poudre  $m$  (g).

Volume après vibration  $V_t$  (mL).

Valeur de densité de taraudage et écart de 3 mesures.

Conditions de test (amplitude, fréquence, nombre de fois).

## 10 Rapport de test

Le rapport de test doit inclure les éléments suivants :

Informations sur l'échantillon :

Numéro d'échantillon, numéro de lot.

Type de poudre (par exemple WC, Co).

Gamme de tailles de particules (par exemple  $0,1-500 \mu\text{m} \pm 0,01 \mu\text{m}$ ).

Teneur en humidité (déterminée selon GB/T 6283, par exemple  $< 0,2 \% \pm 0,05 \%$ ).

Conditions de test :

Paramètres du vibreur : amplitude  $3 \text{ mm} \pm 0,1 \text{ mm}$ , fréquence  $300 \text{ fois/min} \pm 10 \text{ fois/min}$ , nombre de fois  $3000 \text{ fois} \pm 50 \text{ fois}$ .

Capacité du cylindre gradué :  $25 \text{ mL} \pm 0,1 \text{ mL}$  ou  $100 \text{ mL} \pm 0,5 \text{ mL}$ .

Conditions environnementales : température  $20-25^\circ\text{C} \pm 1^\circ\text{C}$ , humidité  $< 50\% \pm 5\% \text{ HR}$ .

Résultats des tests :

La masse, le volume après vibration et la densité après tapotement sont mesurés à chaque fois.

Valeur moyenne de la masse volumique tassée et écart, par exemple  $5,50 \text{ g/cm}^3 \pm 0,01 \text{ g/cm}^3$ , écart  $\pm 1,50 \% \pm 0,01 \%$ .

Numéro de norme : GB/T 5162-2014.

Date du test et opérateur : par exemple, 23 mai 2025, signature de l'opérateur.

## 11 Règles d'inspection

Échantillonnage : Conformément à la norme GB/T 5060, 3 à 5 échantillons sont prélevés sur chaque lot ( $\leq 100 \text{ kg}$ ), chaque échantillon pèse  $50 \text{ g} \pm 0,1 \text{ g}$ .

Fréquence d'inspection :

Inspection d'usine : chaque lot est testé.

Contrôle de type : une fois par an, ou lorsque le processus change.

Règles de décision :

L'écart des trois mesures est  $< \pm 2\% \pm 0,5\%$ , ce qui est considéré comme qualifié.

Si l'écart est  $> \pm 2 \% \pm 0,5 \%$ , de nouveaux échantillons peuvent être retestés. Si le nouveau test échoue à nouveau, le lot est considéré comme non qualifié.

Arrondi numérique : Selon les règles GB/T 8170, conserver deux décimales.

## 12 Assurance qualité

### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

Cohérence du test : l'écart de densité de tassement de différents échantillons dans le même lot est  $< \pm 3\% \pm 0,5\%$ .

Archivage des enregistrements : Les données de test sont archivées pendant 1 an  $\pm 0,1$  an, y compris les enregistrements et rapports originaux.

Gestion des objections : Si l'utilisateur a une objection au résultat, il doit la formuler dans les 30 jours  $\pm 1$  jour suivant la réception de l'échantillon. Les deux parties procéderont à une nouvelle inspection et rendront un jugement sur la base de cette norme.

**COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT**

**Annexe :**

**GB/T 34505-2017 Conditions techniques pour la préparation de poudre de carbure cimenté**

**1 Portée**

Cette norme spécifie les conditions techniques de préparation de la poudre de carbure cimenté, notamment les exigences relatives aux matières premières, le procédé de préparation, les indicateurs de performance, les méthodes d'essai, les règles d'inspection et les exigences de marquage, d'emballage, de transport et de stockage.

Elle s'applique à la poudre de carbure cimenté préparée par métallurgie des poudres avec du carbure de tungstène (WC) comme matrice et des liants métalliques tels que le cobalt (Co) et le nickel (Ni). Elle est largement utilisée dans la fabrication d'outils coupants, d'outils miniers, de pièces résistantes à l'usure, etc.

**2 Références normatives**

Les documents suivants constituent des documents de référence essentiels pour la mise en œuvre de la présente norme. Pour les documents référencés avec date, seules les versions datées s'appliquent ; pour les documents référencés sans date, les versions les plus récentes (y compris tous les amendements) s'appliquent.

GB/T 191 Marquages illustrés pour l'emballage, le stockage et le transport

GB/T 1427 Méthode d'échantillonnage des matériaux carbonés

GB/T 3521 Méthodes d'analyse chimique du graphite

GB/T 3851 Méthode de détermination de la résistance à la flexion du carbure cimenté

GB/T 5124 Méthodes d'analyse chimique du carbure cimenté

GB/T 6283 Détermination de la teneur en eau des produits chimiques - Méthode Karl Fischer

GB/T 1482 Détermination de la fluidité des poudres métalliques - Méthode du rhéomètre de Hall

GB/T 19077.1 Distribution granulométrique par méthode de diffraction laser Partie 1 : Généralités

GB/T 19587 Détermination de la surface spécifique des substances solides par la méthode BET d'adsorption de gaz

Méthode d'essai standard ASTM B212 pour la masse volumique apparente des poudres métalliques

Méthode d'essai standard ASTM B213 pour la fluidité des poudres métalliques

Méthode d'essai standard ASTM B527 pour la masse volumique après tassement des poudres métalliques

**3 Termes et définitions**

Les termes et définitions suivants s'appliquent à la présente norme :

**Poudre de carbure cimenté :** Poudre composée de carbure de tungstène (WC) comme composant principal, avec des phases de liant métallique telles que le cobalt (Co) et le nickel (Ni) ajoutées, et préparée par mélange, broyage, granulation et autres procédés, utilisée dans la production de produits en carbure cimenté.

**Taille des particules Fisher (FSSS) :** Taille moyenne des particules d'une poudre mesurée par un sous-tamis Fisher, en micromètres (  $\mu\text{m}$  ).

**COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT**

Masse volumique apparente : Masse volumique de la poudre à l'état d'empilement naturel, exprimée en  $\text{g}/\text{cm}^3$ .

Masse volumique après tassement : Masse volumique de la poudre à l'état compacté après vibration ou tapotement, exprimée en  $\text{g}/\text{cm}^3$ .

Fluidité : Temps nécessaire à une poudre pour passer à travers un entonnoir standard, exprimé en secondes pour 50 g (s/50 g).

Surface spécifique : Surface totale d'une poudre par unité de masse, exprimée en  $\text{m}^2/\text{g}$ .

Taux d'agglomération : proportion de particules agglomérées dans la poudre, exprimée en %.

#### 4 Classification et code

La poudre de carbure cémenté est classée par utilisation et composition :

Par utilisation : pour outils de coupe (code Q), pour outils miniers (code C), pour pièces résistantes à l'usure (code N).

Par phase de liaison : poudre WC-Co (code WC-Co), poudre WC-Ni (code WC-Ni), poudre WC-Co-Ni (code WC-Co-Ni).

Selon la granulométrie : ultrafine ( FSSS  $\leq 1 \mu\text{m}$  , code UF), fine (  $1 \mu\text{m} < \text{FSSS} \leq 3 \mu\text{m}$  , code F), moyenne (  $3 \mu\text{m} < \text{FSSS} \leq 5 \mu\text{m}$  , code M), grossière ( FSSS  $> 5 \mu\text{m}$  , code C).

Exemple : poudre d'outil de coupe ultrafine WC-Co, nom de code WC-Co-UF-Q.

#### 5 Exigences techniques

##### 5.1 Besoins en matières premières

Carbure de tungstène (WC) :

Pureté :  $\geq 99,8 \% \pm 0,1 \%$ , impuretés (O  $< 0,15 \% \pm 0,01 \%$ , Fe  $< 0,05 \% \pm 0,005 \%$ ).

Taille des particules Fisher :  $0,5-10 \mu\text{m} \pm 0,01 \mu\text{m}$ , à sélectionner en fonction de l'application.

Cobalt (Co) :

Pureté :  $\geq 99,9 \% \pm 0,1 \%$ , impuretés (O  $< 0,1 \% \pm 0,01 \%$ , Fe  $< 0,02 \% \pm 0,005 \%$ ).

Taille des particules :  $\leq 2 \mu\text{m} \pm 0,01 \mu\text{m}$ .

Nickel (Ni) :

Pureté :  $\geq 99,9 \% \pm 0,1 \%$ , impuretés (O  $< 0,1 \% \pm 0,01 \%$ , Fe  $< 0,02 \% \pm 0,005 \%$ ).

Taille des particules :  $\leq 2 \mu\text{m} \pm 0,01 \mu\text{m}$ .

Additifs : Teneur en inhibiteur de grain (tel que VC,  $\text{Cr}_3\text{C}_2$ )  $0,1\%-1\% \pm 0,01\%$ , pureté  $\geq 99,5\% \pm 0,1\%$ .

##### 5.2 Exigences relatives aux ingrédients

Poudre de WC-Co : teneur en Co  $6\%-20\% \pm 1\%$ , carbone total  $5,5\%-6,2\% \pm 0,05\%$ , carbone libre  $< 0,1\% \pm 0,01\%$ .

Poudre WC-Ni : teneur en Ni  $6\%-15\% \pm 1\%$ , carbone total  $5,5\%-6,2\% \pm 0,05\%$ , carbone libre  $< 0,1\% \pm 0,01\%$ .

Poudre WC-Co-Ni : teneur en Co+Ni  $8\%-20\% \pm 1\%$ , carbone total  $5,5\%-6,2\% \pm 0,05\%$ , carbone libre  $< 0,1\% \pm 0,01\%$ .

Teneur en oxygène :  $\leq 0,3 \% \pm 0,01 \%$ , teneur en azote  $\leq 0,05 \% \pm 0,005 \%$ .

##### 5.3 Propriétés physiques

des particules Fisher :  $0,5-10 \mu\text{m} \pm 0,01 \mu\text{m}$ , écart  $\pm 5\% \pm 0,5\%$ .

Densité apparente :  $4,0-5,0 \text{ g}/\text{cm}^3 \pm 0,1 \text{ g}/\text{cm}^3$  (poudre WC -Co  $4,5 \text{ g}/\text{cm}^3 \pm 0,1 \text{ g}/\text{cm}^3$ ).

#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

Masse volumique après tassement :  $5,0-6,2 \text{ g/cm}^3 \pm 0,1 \text{ g/cm}^3$  ( poudre WC -Co  $5,5 \text{ g/cm}^3 \pm 0,1 \text{ g/cm}^3$  ).

Fluidité : 13-16 sec/50 g $\pm 0,5$  sec (poudre WC-Co 14 sec/50 g $\pm 0,5$  sec).

Surface spécifique :  $0,5-5 \text{ m}^2/\text{g} \pm 0,2 \text{ m}^2/\text{g}$  (ajustée en fonction de la granulométrie).

Taux d'agglomération :  $<5\% \pm 1\%$ .

#### 5.4 Exigences morphologiques

Morphologie des particules : sphériques ou presque sphériques, taux de sphéroïdisation  $> 90 \% \pm 2 \%$ , bord  $< 0,1 \mu\text{m} \pm 0,01 \mu\text{m}$ .

Qualité de surface : pas d'oxydes ni d'impuretés apparentes, rugosité de surface  $Ra < 0,2 \mu\text{m} \pm 0,02 \mu\text{m}$ .

#### 5.5 Exigences du processus

Mélange : Uniformité  $> 98 \% \pm 1 \%$ , broyage humide (rapport billes/matériau 3:1-8:1  $\pm 0,1$ , vitesse de rotation 300-500 tr/min  $\pm 10$  tr/min).

Granulation : séchage par atomisation, granulométrie  $20-150 \mu\text{m} \pm 0,1 \mu\text{m}$ , concentration d'alimentation  $25\%-30\% \pm 1\%$ , température d'entrée  $200-250^\circ\text{C} \pm 5^\circ\text{C}$ .

Séchage : humidité  $< 0,2 \% \pm 0,05 \%$ , séchage sous vide ( $80^\circ\text{C} \pm 2^\circ\text{C}$ ,  $< 10^{-2} \text{ Pa} \pm 10^{-3} \text{ Pa}$ ).

### 6 Méthodes d'essai

Composition chimique :

Carbone total, carbone libre : méthode d'absorption infrarouge (GB/T 5124).

Teneur en oxygène et en azote : méthode de fusion sous gaz inerte par chauffage pulsé (GB/T 5124).

Teneur en Co et Ni : méthode ICP-AES (GB/T 5124).

Taille des particules Fisher : méthode d'analyse par tamis Fisher, pression d'air  $0,1-0,5 \text{ psi} \pm 0,01 \text{ psi}$ , porosité  $0,4-0,5 \pm 0,02$ .

Densité apparente : ASTM B212, méthode du cylindre gradué, écart  $< 2 \% \pm 0,5 \%$ .

Densité de taraudage : ASTM B527, fréquence  $50 \text{ Hz} \pm 1 \text{ Hz}$ , amplitude  $1 \text{ mm} \pm 0,1 \text{ mm}$ , écart  $< 2\% \pm 0,5\%$ .

Fluidité : ASTM B213, méthode du rhéomètre Hall (ouverture  $5 \text{ mm} \pm 0,1 \text{ mm}$ ), écart  $< 1$  seconde  $\pm 0,2$  seconde.

Surface spécifique : méthode BET (GB/T 19587).

Taux d'agglomération : méthode SEM (GB/T 16594), comptage de 500 particules.

Teneur en humidité : méthode Karl Fischer (GB/T 6283).

Morphologie : Méthode SEM (GB/T 16594), le taux de sphéroïdisation a été calculé par un logiciel d'analyse d'image.

### 7 Règles d'inspection

Catégories d'inspection :

Inspection en usine : composition chimique, granulométrie Fisher, masse volumique apparente, masse volumique après tassement, fluidité, surface spécifique, taux d'agglomération, teneur en humidité.

Contrôle de type : Toutes les exigences techniques (au moins une fois par an, ou lorsque le processus change ou que le client l'exige).

#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

échantillonnage:

Conformément à la norme GB/T 1427, prélevez  $5 \pm 1$  échantillons de chaque lot ( $\leq 1$  tonne), chacun pesant  $100 \text{ g} \pm 1 \text{ g}$ , et mélangez-les uniformément.

Stockage des échantillons : scellé, humidité  $< 50 \% \pm 5 \% \text{ HR}$ , température  $< 30 \text{ }^\circ\text{C} \pm 2 \text{ }^\circ\text{C}$ .

Règles de décision :

Si tous les éléments répondent aux exigences, le lot est qualifié ; si l'un d'eux est jugé non conforme, une nouvelle inspection est autorisée. Si la nouvelle inspection échoue à nouveau, le lot est jugé non qualifié.

Arrondi numérique : conformément aux règles GB/T 8170.

## 8 Marquage, emballage, transport et stockage

Logo:

La surface extérieure de l'emballage doit être marquée avec : le nom du produit, le code, le numéro de lot, le poids net, la date de production, le fabricant et les marques de stockage et de transport conformément à la norme GB/T 191.

Exemple : WC-Co-UF-Q, numéro de lot 20250523, poids net 50 kg, date de production 2025-05-23, une certaine société de carbure cimenté.

Emballer:

Emballage intérieur : sac en plastique scellé (épaisseur  $> 0,1 \text{ mm} \pm 0,01 \text{ mm}$ ), sous vide.

Emballage extérieur : fût en fer ou fût en plastique (volume  $50\text{-}100 \text{ L} \pm 1 \text{ L}$ ), résistant à l'humidité et aux chocs.

Poids de l'emballage :  $50 \text{ kg} \pm 0,5 \text{ kg}$  par baril ou selon les exigences du client.

transport:

Pendant le transport, évitez l'humidité et les chocs, et évitez les températures élevées ( $> 50 \text{ }^\circ\text{C} \pm 2 \text{ }^\circ\text{C}$ ) et l'humidité élevée ( $> 80 \% \pm 5 \% \text{ HR}$ ).

Conforme aux exigences de transport de la norme GB/T 191 et doté d'un marquage clair.

Stockage:

Environnement de stockage : température  $10\text{-}30^\circ\text{C} \pm 2^\circ\text{C}$ , humidité  $< 50\% \pm 5\% \text{ HR}$ , éviter la lumière directe du soleil.

Durée de conservation :  $\leq 12$  mois  $\pm 1$  mois, une réinspection est nécessaire si la durée de conservation est dépassée.

## 9. Assurance qualité

Engagement qualité : Le fabricant doit fournir un certificat de qualité, comprenant le nom du produit, le code, le numéro de lot, les résultats des tests, la date de production et la signature de l'inspecteur.

Gestion des objections : Si les utilisateurs ont des objections concernant la qualité d'un produit, ils doivent les formuler dans les 30 jours suivant sa réception. Les parties prenantes procéderont conjointement à une nouvelle inspection et prendront une décision sur la base de cette norme.

## Annexe A (Annexe informative) Propriétés typiques de la poudre de carbure cimenté

Poudre ultrafine de WC-Co (UF) :

Taille des particules Fisher :  $0,5\text{-}1 \text{ } \mu\text{m} \pm 0,01 \text{ } \mu\text{m}$

### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

Masse volumique tassée :  $5,5 \text{ g/cm}^3 \pm 0,1 \text{ g/cm}^3$

Fluidité :  $14 \text{ sec}/50 \text{ g} \pm 0,5 \text{ sec}$

Application : Outils d'aviation, durée de vie  $> 15 \text{ heures} \pm 1 \text{ heure}$

Poudre de WC-Ni de granulométrie moyenne (M) :

Taille des particules Fisher :  $3-5 \mu\text{m} \pm 0,01 \mu\text{m}$

Masse volumique tassée :  $5,8 \text{ g/cm}^3 \pm 0,1 \text{ g/cm}^3$

Fluidité :  $13 \text{ sec}/50 \text{ g} \pm 0,5 \text{ sec}$

Application : Trépan minier, durée de vie  $> 1 200 \text{ m} \pm 100 \text{ m}$

### **Annexe B (Annexe normative) Notes supplémentaires sur les méthodes d'essai**

Détermination de la taille des particules Fisher : pression de compactage de l'échantillon  $0,5-1 \text{ kg/cm}^2 \pm 0,1 \text{ kg/cm}^2$ , écart de débit d'air  $< 5 \% \pm 0,5 \%$ .

Détermination de la fluidité : L'humidité de l'environnement de test est  $< 50 \% \pm 5 \% \text{ HR}$  pour empêcher la poudre d'absorber l'humidité et d'affecter les résultats.

Détermination de la surface spécifique : adsorption d'azote, température de prétraitement  $200^\circ\text{C} \pm 5^\circ\text{C}$ , élimination de l'humidité de surface.

### **Résumer**

La norme GB/T 34505-2017 spécifie les conditions techniques de préparation de la poudre de carbure cémenté, couvrant les matières premières, la composition, les propriétés physiques, la morphologie, le procédé et les exigences d'inspection. Le contrôle d'indicateurs tels que la granulométrie Fischer-Tropsch ( $0,5-10 \mu\text{m}$ ), la masse volumique après tassement ( $5,0-6,2 \text{ g/cm}^3$ ) et la fluidité ( $13-16 \text{ secondes}/50 \text{ g}$ ) garantit la qualité de la poudre pour répondre aux exigences des applications haut de gamme telles que les outils aéronautiques (durée de vie  $> 15 \text{ heures}$ ) et les forets miniers (durée de vie  $> 1200 \text{ m}$ ). La norme garantit la cohérence et la fiabilité du produit grâce à des méthodes d'essai scientifiques (ASTM B212, B213, B527) et des règles d'inspection strictes (échantillonnage, détermination).

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



## **Annexe :**

### **la distribution granulométrique de la poudre de carbure de tungstène ?**

La distribution granulométrique de la poudre de carbure de tungstène (WC) est un indicateur important pour évaluer sa qualité et ses performances, et affecte directement la dureté, la ténacité, le comportement de frittage et l'effet d'application du carbure cémenté.

#### **(1) Méthode d'évaluation**

La distribution granulométrique est évaluée en mesurant les propriétés statistiques de la granulométrie de la poudre. Les méthodes suivantes sont couramment utilisées :

##### **Analyse granulométrique par laser :**

Conformément à la norme GB/T 19077.1-2008, la distribution granulométrique est mesurée à l'aide de la technologie de diffraction laser.

Paramètres clés : D10 (10 % des particules sont plus petites que cette valeur), D50 (diamètre médian, 50 % des particules sont plus petites que cette valeur), D90 (90 % des particules sont plus petites que cette valeur).

Précision : Écart  $< 5 \% \pm 1 \%$ , applicable à la plage de  $0,1$  à  $100 \mu\text{m} \pm 0,01 \mu\text{m}$ .

Avantages : résultats rapides, non destructifs et hautement reproductibles.

##### **Microscope électronique à balayage (MEB) :**

Conformément à la norme GB/T 16594-2008, la morphologie et la distribution des tailles des particules ont été observées.

Mesure : Compter les tailles de 100 à 500 particules manuellement ou à l'aide d'un logiciel d'analyse

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

d'images.

Avantages : Reflète intuitivement la morphologie des particules (polygonales, sphériques) et l'agglomération ( $<5\% \pm 1\%$ ).

Inconvénients : La représentativité de l'échantillon est limitée et doit être combinée avec d'autres méthodes.

#### **Méthode de sédimentation :**

Selon la norme GB/T 14634.2-2010, la distribution granulométrique est calculée par la vitesse de sédimentation des particules dans le liquide.

Champ d'application : particules grossières ( $> 5 \mu\text{m} \pm 0,01 \mu\text{m}$ ).

Avantages : adapté aux particules non sphériques, faible coût.

Précision insuffisante pour les poudres fines ( $<1 \mu\text{m} \pm 0,01 \mu\text{m}$ ).

#### **Méthode de la surface spécifique (BET) :**

Selon la norme GB/T 19587-2017, la taille moyenne des particules a été calculée par adsorption d'azote.

Champ d'application : niveau submicronique ( $0,1-1 \mu\text{m} \pm 0,01 \mu\text{m}$ ), surface spécifique  $> 1 \text{ m}^2/\text{g} \pm 0,2 \text{ m}^2/\text{g}$ .

Avantages : reflète les caractéristiques de surface des particules et évalue indirectement la distribution.

Surveillance en ligne :

Utilisez un analyseur de taille de particules laser en ligne pour surveiller la distribution de la taille des particules pendant le processus de mélange ou de préparation en temps réel.

Avantages : Ajustement dynamique du processus, écart  $< 3\% \pm 0,5\%$ .

## **(2) Critères d'évaluation**

La qualité de la distribution granulométrique est évaluée quantitativement par les paramètres suivants :

#### **Largeur de distribution :**

Valeur idéale :  $(D90 - D10)/D50 < 1,5 \pm 0,1$ , indiquant une distribution étroite et des particules uniformes.

Valeur de mauvaise qualité :  $> 2,0 \pm 0,2$ , large distribution, particules inégales.

Importance : La distribution étroite ( $< 1,5 \pm 0,1$ ) réduit la porosité de frittage ( $< 0,05\% \pm 0,01\%$ ) et améliore la densité ( $> 99\% \pm 0,1\%$ ).

Diamètre médian (D50) :

Valeur cible : Selon l'application, niveau submicronique  $0,3 \mu\text{m} \pm 0,01 \mu\text{m}$ , niveau micronique  $1-3 \mu\text{m} \pm 0,01 \mu\text{m}$ , niveau grossier  $5-10 \mu\text{m} \pm 0,01 \mu\text{m}$ .

Écart :  $\pm 10\% \pm 1\%$ , le dépassement de cette limite affectera la cohérence des performances.

Uniformité:

Norme : écart type/valeur moyenne de la taille des particules  $< 0,2 \pm 0,02$ , uniformité  $> 95\% \pm 1\%$ .

Importance : Une uniformité élevée ( $> 95\% \pm 1\%$ ) améliore la dureté et la ténacité ( $HV > 3\ 000 \pm$

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

50,  $K_{1c} > 18 \text{ MPa} \cdot \text{m}^{1/2} \pm 0,5$ ).

Cohérence morphologique :

Standard : taux de sphéroïdisation  $> 90 \% \pm 2 \%$  ou bord polygonal  $< 0,05 \mu\text{m} \pm 0,01 \mu\text{m}$ , taux d'agglomération  $< 5 \% \pm 1 \%$ .

Importance : La morphologie uniforme réduit les défauts de pressage (fissures  $< 1 \% \pm 0,2 \%$ ) et améliore la fluidité ( $< 30 \text{ s}/50 \text{ g} \pm 2 \text{ s}$ , GB/T 1482-2010).

### (3) Jugement de qualité

#### Excellente répartition granulométrique :

Caractéristiques :  $(D_{90} - D_{10})/D_{50} < 1,5 \pm 0,1$ , écart  $D_{50} < 10\% \pm 1\%$ , uniformité  $> 95\% \pm 1\%$ , taux d'agglomération  $< 5\% \pm 1\%$ .

Performances : Densité après frittage  $> 99 \% \pm 0,1 \%$ , dureté HV  $> 2900 \pm 50$ , résistance à la flexion  $> 4000 \text{ MPa} \pm 100 \text{ MPa}$ , quantité d'usure  $< 0,08 \text{ mm} \pm 0,02 \text{ mm}$ .

Applications : Outils aéronautiques (durée de vie  $> 15 \text{ heures} \pm 1 \text{ heure}$ ), forets PCB (durée de vie  $> 10^5 \text{ trous} \pm 10^4 \text{ trous}$ ).

#### Distribution granulométrique typique :

Caractéristiques :  $(D_{90} - D_{10})/D_{50} 1,5-2,0 \pm 0,2$ , écart  $D_{50} 10\%-20\% \pm 1\%$ , uniformité  $90\%-95\% \pm 1\%$ , taux d'agglomération  $5\%-10\% \pm 1\%$ .

Performances : densité  $98\%-99\% \pm 0,1\%$ , dureté HV  $2500-2800 \pm 50$ , résistance à la flexion  $3500-4000 \text{ MPa} \pm 100 \text{ MPa}$ , perte par usure  $0,08-0,15 \text{ mm} \pm 0,03 \text{ mm}$ .

Application : Moules à usage général (durée de vie  $> 10^6 \text{ fois} \pm 10^5 \text{ fois}$ ).

#### Mauvaise distribution granulométrique de qualité :

Caractéristiques :  $(D_{90} - D_{10})/D_{50} > 2,0 \pm 0,2$ , écart  $D_{50} > 20\% \pm 1\%$ , uniformité  $< 90\% \pm 1\%$ , taux d'agglomération  $> 10\% \pm 1\%$ .

Performances : densité  $< 98 \% \pm 0,1 \%$ , porosité  $> 0,2 \% \pm 0,02 \%$ , dureté HV  $< 2500 \pm 50$ , résistance à la flexion  $< 3500 \text{ MPa} \pm 100 \text{ MPa}$ , quantité d'usure  $> 0,15 \text{ mm} \pm 0,03 \text{ mm}$ .

Application : Limitée, sujette aux pannes d'outils (durée de vie  $< 10 \text{ heures} \pm 1 \text{ heure}$ ).

Exemples :

Excellent :  $D_{50} = 0,3 \mu\text{m} \pm 0,01 \mu\text{m}$ ,  $(D_{90}-D_{10})/D_{50} = 1,2 \pm 0,1$ , le carbure cémenté est utilisé pour les outils d'aviation, durée de vie  $> 15 \text{ heures} \pm 1 \text{ heure}$ .

Mauvaise qualité :  $D_{50} = 2 \mu\text{m} \pm 0,01 \mu\text{m}$ ,  $(D_{90}-D_{10})/D_{50} = 2,5 \pm 0,2$ , porosité du carbure cémenté  $> 0,3\% \pm 0,02\%$ , durée de vie  $< 8 \text{ heures} \pm 1 \text{ heure}$ .

### (4) Suggestions d'optimisation

#### Contrôle des matières premières :

Une poudre de tungstène de haute pureté ( $O < 0,05 \% \pm 0,01 \%$ ) et du noir de carbone (taille des particules  $< 0,1 \mu\text{m} \pm 0,01 \mu\text{m}$ ) ont été sélectionnés pour réduire l'écart initial de taille des particules.

Processus de préparation :

La température de carbonisation est de  $1450-1600^\circ\text{C} \pm 10^\circ\text{C}$  et le temps de réaction est contrôlé ( $2-4 \text{ heures} \pm 0,1 \text{ heure}$ ) pour assurer une carbonisation uniforme.

Un refroidissement rapide ( $> 50^\circ\text{C}/\text{min} \pm 5^\circ\text{C}/\text{min}$ ) inhibe la croissance des grains ( $< 0,01 \mu\text{m}/\text{min} \pm 0,001 \mu\text{m}/\text{min}$ ).

#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

**additif:**

0,1 % à 0,5 %  $\pm$  0,01 % de VC ou de Cr<sub>3</sub>C<sub>2</sub> inhibe la croissance des grains et l'écart de taille des particules est  $< 5 \% \pm 1 \%$ .

**Post-traitement :**

La classification du flux d'air (GB/T 19077.1-2008) ajuste la distribution, avec un écart de  $< 2\% \pm 0,5\%$ .

des pores  $< 10 \mu\text{m} \pm 0,1 \mu\text{m}$  ) pour éliminer les agglomérats ( $< 5\% \pm 1\%$ ).

**Surveillance des processus :**

L'analyse de la taille des particules laser en ligne ajuste les paramètres en temps réel pour maintenir l'écart  $D50 < 5 \% \pm 0,5 \%$ .

**(5) Tests et contrôle qualité**

Distribution granulométrique : L'analyse granulométrique laser est calibrée régulièrement (toutes les 100 fois  $\pm$  10 fois) pour garantir une précision D50 de  $\pm 5 \% \pm 0,5 \%$ .

Analyse morphologique : L'analyse SEM a été réalisée une fois par mois pour évaluer le taux d'aggrégation ( $< 5 \% \pm 1 \%$ ) et la cohérence morphologique.

Vérification des performances : Après frittage, la dureté (ISO 4499-2), la résistance (GB/T 3851-2015) et la résistance à l'usure (GB/T 12444-2006) sont testées et corrélées avec les données de distribution.

Analyse statistique : Un modèle de distribution normale a été utilisé et l'écart type/la moyenne a été calculé comme étant  $< 0,2 \pm 0,02$  pour confirmer l'homogénéité.

La distribution granulométrique de la poudre de carbure de tungstène est évaluée par analyse granulométrique laser (D10, D50, D90), MEB, méthode de sédimentation et méthode BET. Les critères d'évaluation comprennent la largeur de distribution ( $< 1,5 \pm 0,1$ ), l'écart D50 ( $< 10 \% \pm 1 \%$ ), l'uniformité ( $> 95 \% \pm 1 \%$ ) et la cohérence morphologique. Une excellente distribution ((D90-D10)/D50  $< 1,5 \pm 0,1$ ) garantit une densité élevée ( $> 99 \% \pm 0,1 \%$ ) et des performances (HV  $> 2900 \pm 50$ ), adaptées aux applications haut de gamme ; une mauvaise distribution ( $> 2,0 \pm 0,2$ ) entraîne une dégradation des performances. Optimisez les matières premières, les processus et le post-traitement, et améliorez la qualité de la distribution grâce à une surveillance en temps réel pour répondre aux besoins des outils aéronautiques (durée de vie  $> 15$  heures  $\pm 1$  heure) et des forets miniers (durée de vie  $> 1200$  m  $\pm 100$  m).

**COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT**

Annexe :

## Quelle est la taille des particules de Fisher ?

Le Fisher Sub-Sieve Sizer (FSSS) est une méthode traditionnelle d'analyse granulométrique qui détermine la taille moyenne des particules de poudre par perméation à l'air. Il est largement utilisé pour caractériser les matières premières en carbure cimenté (comme la poudre de carbure de tungstène WC, la poudre de cobalt Co et la poudre de nickel Ni) et d'autres poudres métalliques.

### (1) Définition

L'analyseur granulométrique Fisher est basé sur le calibre sous-tamis Fisher. Il mesure la perméabilité à l'air de la couche de poudre et estime indirectement la granulométrie moyenne des particules. Le résultat est généralement exprimé en microns ( $\mu\text{m}$ ), reflétant la surface et les caractéristiques des pores de la poudre. Il est particulièrement adapté à l'analyse de la granulométrie des particules fines.

### (2) Principe de mesure

La mesure de la granulométrie de Fisher repose sur l'équation de Carman-Kozeny, qui décrit la relation entre la perméabilité d'un fluide en milieu poreux et la granulométrie, la porosité et l'épaisseur du milieu. Le processus de mesure est le suivant :

#### Préparation des échantillons

Une certaine masse de poudre (généralement  $2 \text{ à } 5 \text{ g} \pm 0,1 \text{ g}$ ) est placée dans un tube à essai spécial et doucement compactée pour former une couche de poudre uniforme (épaisseur  $1 \text{ à } 2 \text{ cm} \pm 0,1 \text{ cm}$ ) avec une porosité contrôlée à  $0,4 \text{ à } 0,5 \pm 0,02$ .

#### Infiltration d'air

Appliquer de l'air sec à une pression constante ( $0,1\text{-}0,5 \text{ psi} \pm 0,01 \text{ psi}$ ) à travers le tube à essai et mesurer le débit d'air à travers la couche de poudre (volume par unité de temps, mL/s).

#### Calcul de résistance

La résistance de la couche de poudre à l'air est proportionnelle à la surface des particules. Plus la résistance est élevée, plus les particules sont petites. Le débit d'air est proportionnel au carré du diamètre moyen des particules.

#### Estimation de la taille des particules

basé sur l'équation de Karman-Cohen et la courbe d'étalonnage, combinant la surface et la porosité des poudres.

L'expression mathématique se simplifie en :

#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

数学表达式简化为：

$$D = k \cdot \sqrt{\frac{Q \cdot \eta \cdot L}{P \cdot A \cdot (1 - \epsilon)^2}}$$

其中：

- $D$ ：费氏粒度 ( $\mu\text{m}$ )
- $k$ ：仪器校准常数
- $Q$ ：空气流量 ( $\text{mL/s}$ )
- $\eta$ ：空气粘度 ( $\text{Pa}\cdot\text{s}$ )
- $L$ ：粉末层厚度 ( $\text{cm}$ )
- $P$ ：压力差 ( $\text{Pa}$ )
- $A$ ：粉末层横截面积 ( $\text{cm}^2$ )
- $\epsilon$ ：孔隙率

### (3) Champ d'application

de granulométrie : 0,1-50  $\mu\text{m} \pm 0,01 \mu\text{m}$  , particulièrement adaptée aux poudres submicroniques et microniques (telles que 0,3-10  $\mu\text{m} \pm 0,01 \mu\text{m}$  pour la poudre WC) .

Propriétés de la poudre : Convient aux particules sphériques ou presque sphériques avec une grande cohérence dans la morphologie des particules (taux de sphéroïdisation  $> 90 \% \pm 2 \%$ ).

Limitations : Ne convient pas aux poudres dont la granulométrie est  $> 50 \mu\text{m}$  ou à une agglomération sévère ( $> 10 \% \pm 1 \%$ ) en raison d'une perméabilité à l'air limitée.

### (4) Avantages et inconvénients

avantage:

Simple et rapide : temps de mesure  $< 5 \text{ minutes} \pm 0,5 \text{ minute}$ , facile à utiliser, adapté aux tests par lots.

Surface relative : reflète la surface spécifique de la poudre ( $> 1 \text{ m}^2 / \text{g} \pm 0,2 \text{ m}^2 / \text{g}$ ), qui est étroitement liée au comportement de frittage.

Faible coût : L'équipement est peu coûteux ( $< 5000 \text{ USD} \pm 500 \text{ USD}$ ) et facile à entretenir.

défaut:

Indicateur unique : fournit uniquement la taille moyenne des particules, sans informations sur la distribution granulométrique (telles que D10, D90).

Dépend de l'étalonnage : les résultats sont affectés par la courbe d'étalonnage et le degré de compactage de la poudre et peuvent varier jusqu'à  $\pm 10 \% \pm 1 \%$ .

Limitation de la morphologie : L'erreur de mesure des particules non sphériques ou poreuses (telles que la poudre agglomérée) est importante ( $> 15 \% \pm 2 \%$ ).

### (5) Méthode de calcul et étalonnage

Étalonnage : utilisez une poudre standard (telle que SiC ou  $\text{Al}_2\text{O}_3$  avec une taille de particule connue, 0,5-10  $\mu\text{m} \pm 0,01 \mu\text{m}$  ) pour étalonner l'instrument afin de garantir une précision de mesure de  $\pm 5 \% \pm 0,5 \%$ .

Répétabilité : Chaque lot a été testé 3 à 5 fois et la valeur moyenne a été prise. L'écart type était  $<$

#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

0,1  $\mu\text{m} \pm 0,01 \mu\text{m}$  .

Facteur de correction : Ajuster la constante de Karman-Cohen en fonction de la densité de la poudre (WC 15,63 g/cm<sup>3</sup>  $\pm$  0,05 g/cm<sup>3</sup> ) .

#### (6) Facteurs d'influence

Compactage de poudre : pression de compactage de 0,5 à 1 kg/cm<sup>2</sup>  $\pm$  0,1 kg/cm<sup>2</sup> . Si la pression de compactage est trop forte ( $> 2 \text{ kg/cm}^2$  ) , la porosité sera réduite ( $< 0,3 \pm 0,02$ ) et le résultat sera plus petit. Si la pression de compactage est trop faible ( $< 0,2 \text{ kg/cm}^2$  ) , la porosité sera élevée ( $> 0,6 \pm 0,02$ ) et le résultat sera plus grand.

Humidité : La teneur en humidité de l'échantillon  $> 0,5 \% \pm 0,1 \%$  affecte le flux d'air et doit être séchée ( $< 0,1 \% \pm 0,01 \%$ ).

Morphologie des particules : Les particules non sphériques (bords  $> 0,1 \mu\text{m} \pm 0,01 \mu\text{m}$  ) entraînent des erreurs d'estimation de surface  $> 10 \% \pm 1 \%$  .

Atmosphère : Le test doit être réalisé dans de l'air sec pour éviter les interférences du CO<sub>2</sub> ou de l'O<sub>2</sub> ( O<sub>2</sub>  $< 5 \text{ ppm} \pm 1 \text{ ppm}$ ).

#### (7) Effet de l'application

Préparation du carbure cémenté :

La poudre WC avec une granulométrie de 0,5 à 2  $\mu\text{m} \pm 0,01 \mu\text{m}$  a une densité de  $> 99 \% \pm 0,1 \%$  après frittage et une dureté de HV  $> 2900 \pm 50$ , ce qui convient aux outils aéronautiques (durée de vie  $> 15 \text{ heures} \pm 1 \text{ heure}$ ).

La poudre WC-Co avec une granulométrie Fischer-Tropsch de 3-5  $\mu\text{m} \pm 0,01 \mu\text{m}$  et une résistance à la flexion de  $> 4000 \text{ MPa} \pm 100 \text{ MPa}$ , convient aux forets miniers (durée de vie  $> 1200 \text{ m} \pm 100 \text{ m}$ ).

Contrôle de qualité:

L'écart de taille des particules Fisher d'un lot à l'autre est  $< 10 \% \pm 1 \%$ , ce qui garantit la cohérence du frittage (porosité  $< 0,05 \% \pm 0,01 \%$ ).

Par rapport à l'analyse granulométrique laser (D50), la largeur de distribution a été vérifiée ((D90-D10)/D50  $< 1,5 \pm 0,1$ ).

#### (8) Tests et contrôle qualité

Étalonnage de l'instrument : étalonner mensuellement à l'aide d'une poudre standard et enregistrer l'écart de la courbe d'étalonnage  $< 5 \% \pm 0,5 \%$ .

Conditions de test : température ambiante 20-25°C  $\pm 1^\circ\text{C}$ , humidité  $< 40\% \text{ RH} \pm 5\%$ , s'assurer que l'air est sec.

Vérification des résultats : Par rapport à la méthode de surface spécifique BET (GB/T 19587-2017), l'écart de surface est  $< 10\% \pm 1\%$ .

Enregistrements : Enregistrez la valeur de la taille des particules Fisher, la pression de compactage et le débit d'air pour chaque lot et conservez-les dans vos archives pendant 1 an  $\pm 0,1 \text{ an}$ .

#### Résumer

La granulométrie Fisher est une méthode traditionnelle de mesure de la granulométrie basée sur la perméabilité à l'air. Elle utilise l'équation de Karman-Cohen pour estimer la granulométrie moyenne

#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

de la poudre (0,1-50  $\mu\text{m}$ ) . Elle est particulièrement adaptée à l'analyse de la surface et des caractéristiques des pores des matières premières en carbure cimenté. Sa mesure est simple, rapide (< 5 minutes) et peu coûteuse, mais elle ne fournit qu'une valeur moyenne et repose sur l'étalonnage et la morphologie des particules. L'optimisation de la pression de compactage (0,5-1  $\text{kg}/\text{cm}^2$ ) et du contrôle de l'humidité (< 0,1 %) peut améliorer la précision ( $\pm 5\%$ ). Dans la préparation du carbure cimenté, la granulométrie Fisher guide le raffinage de la poudre (0,5-5  $\mu\text{m}$ ) pour garantir les performances de frittage (densité > 99 %, dureté > 2900 HV). Elle est largement utilisée dans la production d'outils aéronautiques et de forets miniers.

**COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT**

## Types de billes pour broyeurs à boulets de prétraitement des poudres

Dans le processus de prétraitement des poudres de carbure cémenté, comme la poudre de carbure de tungstène (WC), le broyage à boulets est essentiel pour obtenir un mélange, un raffinage et une distribution uniforme de la poudre. Le type de boulet utilisé influence directement l'efficacité du broyage, la pureté de la poudre et les performances finales.

### (1) Types de billes couramment utilisés pour le broyage à boulets

#### **Bille en acier au carbone :**

Matériau : acier à faible teneur en carbone ou acier à teneur moyenne en carbone (tel que l'acier 45#, l'acier 60Mn), la surface peut être chromée.

caractéristiques:

Densité :  $7,8-7,9 \text{ g/cm}^3 \pm 0,05 \text{ g/cm}^3$  .

Dureté : HRC 50-60±2.

Résistance à l'usure : taux d'usure  $< 0,1 \% \pm 0,02 \%/h$ .

Coût : faible, adapté à la production de masse.

Avantages : abordable, force d'impact élevée, adapté au broyage grossier (taille des particules  $> 5 \mu\text{m} \pm 0,01 \mu\text{m}$  ) .

Inconvénients : Impuretés de Fe faciles à introduire ( $> 0,02 \% \pm 0,005 \%$ ), affectant la pureté de la poudre de WC ( $< 99,9 \% \pm 0,01 \%$ ), et nécessitant un décapage ultérieur.

Application : Mélange primaire et broyage grossier de poudres WC-Co.

#### **Bille en acier inoxydable :**

Matériau : acier inoxydable austénitique tel que 304, 316L, etc.

caractéristiques:

Densité :  $7,9-8,0 \text{ g/cm}^3 \pm 0,05 \text{ g/cm}^3$  .

Dureté : HRC 25-35±2.

Résistance à la corrosion : meilleure que l'acier au carbone, taux de corrosion  $< 0,01 \text{ mm/an} \pm 0,002 \text{ mm/an}$  (pH 2-12).

Résistance à l'usure : taux d'usure  $< 0,05 \% \pm 0,01 \%/h$ .

Avantages : résistance à la corrosion, faible contamination en Fe ( $< 0,01\% \pm 0,002\%$ ), adapté au broyage fin.

Inconvénients : dureté inférieure et efficacité de broyage inférieure à celle des billes en carbure.

Application : Poudre WC submicronique ( $0,1-1 \mu\text{m} \pm 0,01 \mu\text{m}$  ) broyage fin.

#### **Bille en carbure :**

Matériau : alliage WC-Co (teneur en Co 6%-12%±0,5%).

caractéristiques:

Densité :  $14,5-15,0 \text{ g/cm}^3 \pm 0,05 \text{ g/cm}^3$  .

Dureté : HRC 65-75±2.

Résistance à l'usure : taux d'usure  $< 0,01 \% \pm 0,002 \%/h$ .

#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

Résistance à la corrosion : meilleure que l'acier au carbone, taux de corrosion  $< 0,005 \text{ mm/an} \pm 0,001 \text{ mm/an}$ .

Avantages : dureté élevée, résistance à l'usure, moins de pollution (consistance de la phase WC  $> 99,8 \% \pm 0,02 \%$ ), adapté aux exigences de pureté élevée.

Inconvénients : Coût élevé (environ 10 à 20 fois celui de l'acier au carbone) .

Application : Préparation de poudre WC ultrafine ( $< 0,5 \mu\text{m} \pm 0,01 \mu\text{m}$ ) et de carbure cimenté de haute précision.

#### **Bille de zircon ( $\text{ZrO}_2$ ) :**

Matériau : Oxyde de zirconium stabilisé ( $\text{Y}_2\text{O}_3$  stabilisé,  $3\%-5\% \pm 0,1\%$ ).

caractéristiques:

Densité :  $6,0-6,1 \text{ g/cm}^3 \pm 0,05 \text{ g/cm}^3$  .

Dureté : HRC 70-80 $\pm 2$ .

Résistance à l'usure : taux d'usure  $< 0,02 \% \pm 0,005 \%/h$ .

Résistance à la corrosion : Excellente, haute stabilité chimique (pH 0-14).

Avantages : Pas de pollution métallique, adapté à la poudre WC de haute pureté ( $\text{O} < 0,05 \% \pm 0,01 \%$ ), surface lisse ( $\text{Ra} < 0,2 \mu\text{m} \pm 0,02 \mu\text{m}$ ) .

Inconvénients : faible densité, efficacité de broyage inférieure à celle des billes en carbure.

Application : Poudre WC à l'échelle nanométrique ( $< 0,1 \mu\text{m} \pm 0,01 \mu\text{m}$ ) et matériaux biomédicaux.

#### **Billes d' alumine ( $\text{Al}_2\text{O}_3$ ) :**

Matériau : alumine de haute pureté ( teneur en  $\text{Al}_2\text{O}_3 > 99 \% \pm 0,01\%$ ).

caractéristiques:

Densité :  $3,6-3,9 \text{ g/cm}^3 \pm 0,05 \text{ g/cm}^3$  .

Dureté : HRC 80-90 $\pm 2$ .

Résistance à l'usure : taux d'usure  $< 0,03 \% \pm 0,005 \%/h$ .

Résistance à la corrosion : Bonne, résistant aux acides et aux alcalis (pH 2-12).

Avantages : dureté élevée, coût modéré, pas de pollution métallique.

Inconvénients : cassant et facile à casser (taux de casse  $< 1\% \pm 0,2\%$ ).

Application : Broyage de poudre WC moyennement grossière ( $1-5 \mu\text{m} \pm 0,01 \mu\text{m}$ ) et de matériaux céramiques.

#### **Bille de nitrure de silicium ( $\text{Si}_3\text{N}_4$ ) :**

Matériau : Nitrure de silicium, stabilisé avec  $\text{Y}_2\text{O}_3$  ou  $\text{Al}_2\text{O}_3$  .

caractéristiques:

Densité :  $3,2-3,3 \text{ g/cm}^3 \pm 0,05 \text{ g/cm}^3$  .

Dureté : HRC 85-95 $\pm 2$ .

Résistance à l'usure : taux d'usure  $< 0,01 \% \pm 0,002 \%/h$ .

Résistance à la corrosion : Excellente, résistante aux acides forts et aux alcalis.

Avantages : dureté élevée, faible densité, adapté au meulage à grande vitesse.

Inconvénients : coût élevé et production complexe.

Application : Poudre de nano WC de haute pureté et matériaux électroniques haut de gamme.

#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

## (2) Base de sélection

Dureté et résistance à l'usure :

Matériaux à haute dureté (tels que billes de carbure,  $ZrO_2$ , Les  $Si_3N_4$ ) conviennent au broyage fin et à la poudre ultrafine ( $< 0,5 \mu m \pm 0,01 \mu m$ ), avec un taux d'usure de  $< 0,01 \% \pm 0,002 \% / h$ .

Les matériaux à faible dureté (tels que les billes en acier au carbone) conviennent au broyage grossier, avec une efficacité élevée mais une faible résistance à l'usure.

Contrôle de la pollution :

Aucune contamination métallique requise ( $O < 0,05 \% \pm 0,01 \%$ ,  $Fe < 0,01 \% \pm 0,002 \%$ ), choisissez  $ZrO_2$ ,  $Al_2O_3$  ou  $Si_3N_4$ .

Une légère contamination est autorisée ( $Fe < 0,02 \% \pm 0,005 \%$ ) et des billes en acier au carbone ou en acier inoxydable peuvent être sélectionnées.

Densité et efficacité de broyage :

Les billes à haute densité (telles que les billes en carbure,  $14,5-15,0 g/cm^3 \pm 0,05 g/cm^3$ ) offrent une force d'impact élevée et conviennent au meulage de matériaux durs.

Les billes de faible densité (telles que  $Al_2O_3$ ,  $3,6-3,9 g/cm^3 \pm 0,05 g/cm^3$ ) conviennent au broyage léger et réduisent le surécrasement.

Coût et taille :

Les billes en acier au carbone ou en acier inoxydable sont utilisées pour la production à grande échelle à faible coût ( $< 10 USD/kg \pm 1 USD/kg$ ).

Pour les applications haut de gamme, choisissez des billes de carbure ou du  $ZrO_2$  ( $50-200 USD/kg \pm 10 USD/kg$ ).

Correspondance du diamètre de la bille :

Broyage grossier :  $10-20 mm \pm 0,1 mm$  (comme une bille en acier au carbone).

Broyage fin :  $2-10 mm \pm 0,1 mm$  (comme les billes de carbure,  $ZrO_2$ ).

Broyage ultrafin :  $0,5-2 mm \pm 0,1 mm$  (tel que  $Si_3N_4$ ).

## (3) Exemples d'application

Bille en acier au carbone : utilisée pour le mélange grossier WC-Co (taille des particules  $5-10 \mu m \pm 0,01 \mu m$ ), efficacité de broyage  $> 90 \% \pm 2 \%$ , mais les impuretés Fe doivent être éliminées par décapage ( $< 0,01 \% \pm 0,002 \%$ ).

Billes de carbure : utilisées pour le meulage ultrafin WC ( $0,3 \mu m \pm 0,01 \mu m$ ), dureté HV  $> 2900 \pm 50$ , contamination  $< 0,005 \% \pm 0,001 \%$ , adaptées aux outils d'aviation (durée de vie  $> 15$  heures  $\pm 1$  heure).

de  $ZrO_2$  : utilisées pour la poudre nano WC ( $0,1 \mu m \pm 0,01 \mu m$ ), contamination O  $< 0,03 \% \pm 0,005 \%$ , utilisées pour les forets PCB (durée de vie  $> 10^5$  trous  $\pm 10^4$  trous).

Bille  $Si_3N_4$  : utilisée pour la nanopoudre WC de haute pureté, dureté HV  $> 3000 \pm 50$ , excellente résistance à la corrosion, adaptée aux équipements chimiques (durée de vie  $> 2$  ans  $\pm 0,2$  an).

## (4) Optimisation et maintenance

Rapport bille/matériau : 5:1 à 10:1  $\pm 0,1$  recommandé. Un rapport trop élevé entraînera un surbroyage (écart granulométrique  $> 10 \% \pm 1 \%$ ); un rapport trop faible réduira l'efficacité.

Vitesse de rotation : 200-400 tr/min  $\pm 10$  tr/min. Une vitesse trop élevée ( $> 500$  tr/min  $\pm 10$  tr/min)

### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

augmente l'usure ( $> 0,1 \% \pm 0,02 \%/\text{h}$ ).

Nettoyage : Nettoyer avec de l'éthanol ou du HCl dilué ( $\text{pH } 2 \pm 0,1$ ) après chaque broyage pour éviter toute contamination croisée ( $\text{Fe} < 0,005 \% \pm 0,001 \%$ ).

remplacé toutes les 500 heures  $\pm 50$  heures,  $\text{ZrO}_2$  toutes les 1000 heures  $\pm 100$  heures, en fonction du suivi du taux d'usure.

Les types de billes pour le broyage à boulets comprennent les billes en acier au carbone (faible coût, broyage grossier), les billes en acier inoxydable (résistantes à la corrosion, broyage fin), les billes en carbure (dureté élevée, broyage ultrafin), les billes en oxyde de zirconium (non polluantes, de qualité nanométrique), les billes en alumine (broyage moyennement grossier) et les billes en nitrure de silicium (haute pureté et résistance à la corrosion). Le choix se fait en fonction de la dureté, de la résistance à l'usure, du contrôle de la pollution, de la densité et du coût, du diamètre des billes correspondant ( $0,5\text{-}20 \text{ mm} \pm 0,1 \text{ mm}$ ) et des exigences de l'application. Les billes en carbure et en  $\text{ZrO}_2$  conviennent à la poudre WC de haute précision ( $< 0,5 \mu\text{m} \pm 0,01 \mu\text{m}$ ), tandis que les billes en acier au carbone conviennent à l'usinage grossier. En optimisant le rapport bille/matériau ( $5:1\text{-}10:1 \pm 0,1$ ) et la vitesse de rotation ( $200\text{-}400 \text{ tr/min} \pm 10 \text{ tr/min}$ ), et en effectuant un entretien régulier (nettoyage, remplacement), l'efficacité de broyage et la qualité de la poudre peuvent être améliorées pour répondre aux exigences de performance des outils aéronautiques (durée de vie  $> 15$  heures  $\pm 1$  heure) et des forets miniers (durée de vie  $> 1200 \text{ m} \pm 100 \text{ m}$ ).

**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)

## Liants non métalliques dans le prétraitement des poudres

Lors de la préparation du carbure cémenté, le prétraitement de la poudre est une étape clé pour améliorer sa fluidité et ses performances de pressage. Les liants non métalliques (également appelés liants organiques) jouent un rôle important dans ce processus : ils favorisent la liaison des particules, renforcent la résistance du corps vert et assurent sa stabilité avant le frittage. Voici une analyse détaillée des liants non métalliques : type, caractéristiques, mécanisme d'action, impact sur l'application et stratégie d'optimisation.

### (1) Types et caractéristiques des liants non métalliques

Les liants non métalliques sont généralement des composés organiques qui doivent présenter une bonne adhérence, une faible température de décomposition et une élimination facile afin de ne pas nuire aux performances du carbure cémenté. Parmi les types courants, on trouve :

#### Alcool polyvinylique (PVA)

Structure chimique :  $[-CH_2 -CH(OH)-]_n$ , polymère hydrosoluble.

Caractéristiques : Force de liaison élevée ( $> 5 \text{ MPa} \pm 0,5 \text{ MPa}$ ), température de décomposition  $250-350 \text{ }^\circ\text{C} \pm 5 \text{ }^\circ\text{C}$ , carbone résiduel  $< 0,1 \% \pm 0,01 \%$ .

Avantages : Soluble dans l'eau, facile à mélanger, faible coût.

Inconvénients : Très hygroscopique (taux d'absorption d'humidité  $> 2 \% \pm 0,2 \%$ ), l'humidité doit être contrôlée ( $< 50 \% \text{ HR} \pm 5 \%$ ).

#### Polyéthylène glycol (PEG)

Structure chimique :  $HO-(CH_2 CH_2 O)_n - H$ , différents poids moléculaires (200-6000) disponibles.

Caractéristiques : Température de décomposition  $300-400^\circ\text{C} \pm 5^\circ\text{C}$ , bonne lubrification (coefficient de frottement  $< 0,2 \pm 0,02$ ), carbone résiduel  $< 0,05\% \pm 0,01\%$ .

Avantages : bonne fluidité ( $< 20 \text{ s}/50 \text{ g} \pm 2 \text{ s}$ ), adapté aux poudres fines ( $< 0,5 \mu\text{m} \pm 0,01 \mu\text{m}$ ).

Inconvénients : Viscosité élevée à basse température ( $> 10 \text{ Pa}\cdot\text{s} \pm 1 \text{ Pa}\cdot\text{s}$ ), nécessite un chauffage pour le mélange ( $60^\circ\text{C} \pm 2^\circ\text{C}$ ).

#### Paraffine

Structure chimique :  $C_n H_{2n+2}$  ( $n=20-40$ ), composé hydrocarboné.

Caractéristiques : Point de fusion  $50-70^\circ\text{C} \pm 2^\circ\text{C}$ , température de décomposition  $200-300^\circ\text{C} \pm 5^\circ\text{C}$ , carbone résiduel  $< 0,2\% \pm 0,01\%$ .

Avantages : fort pouvoir lubrifiant (coefficient de frottement  $< 0,15 \pm 0,02$ ), facile à retirer.

Inconvénients : Volatil à haute température ( $> 80^\circ\text{C} \pm 2^\circ\text{C}$ ), doit être stocké à basse température.

#### acide stéarique

Formule chimique :  $C_{17}H_{35}COOH$ , acide gras.

Caractéristiques : Point de fusion  $69^\circ\text{C} \pm 2^\circ\text{C}$ , température de décomposition  $250-350^\circ\text{C} \pm 5^\circ\text{C}$ , carbone résiduel  $< 0,1\% \pm 0,01\%$ .

Avantages : Il possède à la fois des propriétés de lubrification et de liaison et convient au formage

#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

à haute pression ( $> 500 \text{ MPa} \pm 10 \text{ MPa}$ ).

Inconvénients : Facile à décomposer à haute température, la température de traitement doit être contrôlée ( $< 100^\circ\text{C} \pm 2^\circ\text{C}$ ).

### Autres liants

Polyméthacrylate de méthyle (PMMA) : température de décomposition  $300\text{-}400^\circ\text{C} \pm 5^\circ\text{C}$ , adapté au moulage de haute précision.

Ethylcellulose (EC) : soluble dans l'éthanol, température de décomposition  $250\text{-}350^\circ\text{C} \pm 5^\circ\text{C}$ , adaptée à la granulation par pulvérisation.

## (2) Mécanisme d'action

Les liants non métalliques améliorent les propriétés de la poudre grâce à des effets physiques et chimiques lors du prétraitement de la poudre :

### Liaison des particules :

Au cours du processus de mélange (vitesse de rotation  $300 \text{ tr/min} \pm 10 \text{ tr/min}$ ), le liant a enveloppé les particules de WC et de Co/Ni pour former un film (épaisseur  $< 0,1 \mu\text{m} \pm 0,01 \mu\text{m}$ ), ce qui a amélioré la force de liaison entre les particules ( $> 3 \text{ MPa} \pm 0,5 \text{ MPa}$ ).

Par exemple, une solution de PVA (concentration  $5 \% \pm 0,1 \%$ ) lie les particules par liaison hydrogène (énergie de liaison  $\sim 20 \text{ kJ/mol} \pm 2 \text{ kJ/mol}$ ).

### Mobilité améliorée :

La paraffine et le PEG réduisent la friction entre les particules (coefficient de friction  $< 0,2 \pm 0,02$ ) et la fluidité de la poudre est améliorée à  $< 20 \text{ s/50 g} \pm 2 \text{ s}$  (GB/T 1482-2010).

Convient aux particules fines ( $< 0,5 \mu\text{m} \pm 0,01 \mu\text{m}$ ) et à la réduction de l'agglomération ( $< 5\% \pm 1\%$ ).

### Améliore la résistance du blank :

Après pressage (pression  $200\text{-}500 \text{ MPa} \pm 10 \text{ MPa}$ ), le liant forme une structure en réseau (porosité  $< 10\% \pm 1\%$ ) et la résistance du corps vert est  $> 10 \text{ MPa} \pm 1 \text{ MPa}$ , garantissant la stabilité de la manipulation et du traitement.

Par exemple, la résistance à la compression de l'ébauche contenant  $2 \% \pm 0,1 \%$  de paraffine est  $> 15 \text{ MPa} \pm 1 \text{ MPa}$ .

### Facilité de retrait :

Le liant est décomposé en  $\text{CO}_2$  et  $\text{H}_2\text{O}$  (taux de décomposition  $> 99 \% \pm 1 \%$ ) lors de l'étape de pré-frittage ( $300\text{-}500^\circ\text{C} \pm 5^\circ\text{C}$ ), et le carbone résiduel est  $< 0,1 \% \pm 0,01 \%$ , évitant ainsi d'affecter les performances du carbure cémenté.

## (3) Impact de l'application

La sélection et l'utilisation de liants non métalliques ont une influence importante sur le processus de préparation du carbure cémenté et sur les performances finales :

### Fluidité de la poudre :

La poudre WC-Co contenant  $1\% \pm 0,1\%$  de PEG a une fluidité de  $< 20 \text{ s/50 g} \pm 2 \text{ s}$  et convient au pressage automatique (efficacité  $> 500 \text{ pièces/heure} \pm 50 \text{ pièces/heure}$ ).

a amélioré la fluidité des poudres submicroniques ( $< 0,5 \mu\text{m} \pm 0,01 \mu\text{m}$ ) de  $10 \% \pm 2 \%$  et réduit

#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

l'usure du moule ( $<0,01 \text{ mm} \pm 0,002 \text{ mm}$ ).

**Propriétés corporelles :**

Le PVA ( $2 \% \pm 0,1 \%$ ) améliore la résistance du corps vert ( $> 12 \text{ MPa} \pm 1 \text{ MPa}$ ) et convient au moulage de formes complexes (écart dimensionnel  $< 0,05 \text{ mm} \pm 0,01 \text{ mm}$ ).

L'acide stéarique ( $1\% \pm 0,1\%$ ) réduit la pression de pressage ( $<400 \text{ MPa} \pm 10 \text{ MPa}$ ) et réduit les fissures dans le corps vert ( $<1\% \pm 0,2\%$ ).

**Performances de frittage :**

Le carbone résiduel dans le liant est  $< 0,1 \% \pm 0,01 \%$ , ce qui garantit que la densité après frittage est  $> 99 \% \pm 0,1 \%$  et la dureté HV  $> 2000 \pm 30$ .

Un excès de carbone résiduel ( $> 0,2 \% \pm 0,01 \%$ ) entraîne une augmentation de la porosité ( $> 0,2 \% \pm 0,02 \%$ ) et une diminution de la résistance à la flexion de  $5 \% \pm 1 \%$  ( $< 4 000 \text{ MPa} \pm 100 \text{ MPa}$ ).

**Performance ultime :**

$\mu \text{ m}$ ) contenant  $2\% \pm 0,1\%$  de paraffine, dureté HV  $2200 \pm 30$ , utilisé pour les outils aéronautiques (durée de vie  $> 15 \text{ heures} \pm 1 \text{ heure}$ ).

Le corps vert contenant  $1 \% \pm 0,1 \%$  de PVA a une porosité de  $< 0,05 \% \pm 0,01 \%$  après frittage et une résistance à la compression de  $> 4 200 \text{ MPa} \pm 100 \text{ MPa}$ , ce qui convient aux forets miniers (durée de vie  $> 1 200 \text{ m} \pm 100 \text{ m}$ ).

**(4) Stratégie d'optimisation**

Afin de donner pleinement jeu au rôle des liants non métalliques, il est nécessaire d'optimiser la quantité d'ajout, le processus de mélange, le processus d'élimination, etc. :

**Montant de l'ajout :**

Une valeur de  $1 \% \pm 0,1 \%$  à  $3 \% \pm 0,1 \%$  est recommandée. Une quantité excessive ( $> 5 \% \pm 0,1 \%$ ) entraînera une augmentation du carbone résiduel ( $> 0,3 \% \pm 0,01 \%$ ) et une diminution de la dureté de  $3 \% \pm 0,5 \%$  (HV  $< 2 000 \pm 30$ ).

Par exemple,  $2 \% \pm 0,1 \%$  de PEG optimise la fluidité ( $< 20 \text{ s}/50 \text{ g} \pm 2 \text{ s}$ ) et la résistance du corps vert ( $> 10 \text{ MPa} \pm 1 \text{ MPa}$ ).

**Processus de mélange :**

Mélange humide : le PVA et le PEG sont dissous dans l'eau ou l'éthanol (concentration  $5 \% \pm 0,1 \%$ ), granulés par pulvérisation (vitesse de rotation  $1 000 \text{ tr}/\text{min} \pm 50 \text{ tr}/\text{min}$ ) et l'uniformité des particules est  $> 95 \% \pm 1 \%$ .

Mélange à sec : chauffer et faire fondre la paraffine et l'acide stéarique ( $60^\circ\text{C} \pm 2^\circ\text{C}$ ), broyeur à boulets (vitesse  $300 \text{ tr}/\text{min} \pm 10 \text{ tr}/\text{min}$ , durée 5-10 heures  $\pm 0,5 \text{ heure}$ ), et réduire l'agglomération ( $< 3\% \pm 1\%$ ).

Optimisation : Le broyage planétaire à billes (rapport billes/matériau  $5:1 \pm 0,1$ ) est utilisé pour assurer une distribution uniforme du liant (écart  $< 5\% \pm 1\%$ ).

**Processus de suppression :**

Pré-frittage :  $300\text{-}500^\circ\text{C} \pm 5^\circ\text{C}$ , atmosphère  $\text{H}_2$  ( $\text{O}_2 < 10 \text{ ppm} \pm 1 \text{ ppm}$ ), vitesse de chauffe  $2^\circ\text{C}/\text{min} \pm 0,2^\circ\text{C}/\text{min}$ , taux de décomposition  $> 99\% \pm 1\%$ .

Dégraissage sous vide :  $< 10^{-2} \text{ Pa} \pm 10^{-3} \text{ Pa}$ ,  $400^\circ\text{C} \pm 5^\circ\text{C}$ , carbone résiduel  $< 0,05\% \pm 0,01\%$ .

Optimisation : Chauffage par paliers ( $200^\circ\text{C} \pm 5^\circ\text{C}$  pendant 1 heure  $\pm 0,1 \text{ heure}$ ,  $400^\circ\text{C} \pm 5^\circ\text{C}$  pendant 2 heures  $\pm 0,1 \text{ heure}$ ) pour garantir l'absence de résidus.

**COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT**

**Contrôle environnemental :**

Humidité < 50 % RH ± 5 % pour éviter que le PVA n'absorbe l'humidité et ne provoque des fissures dans le corps (< 1 % ± 0,2 %).

Température < 30°C ± 2°C pour éviter la volatilisation de la paraffine (perte < 0,1% ± 0,01%).

**(5) Tests et contrôle qualité**

Teneur en liant : Analyse thermogravimétrique (TGA, GB/T 27761-2011), mesurant la quantité ajoutée et la quantité résiduelle (écart < 0,05 % ± 0,01 %).

Fluidité : Selon GB/T 1482-2010, mesurer le débit (< 20 s/50 g ± 2 s).

Résistance du corps vert : essai de compression (GB/T 3851-2015), résistance > 10 MPa ± 1 MPa.

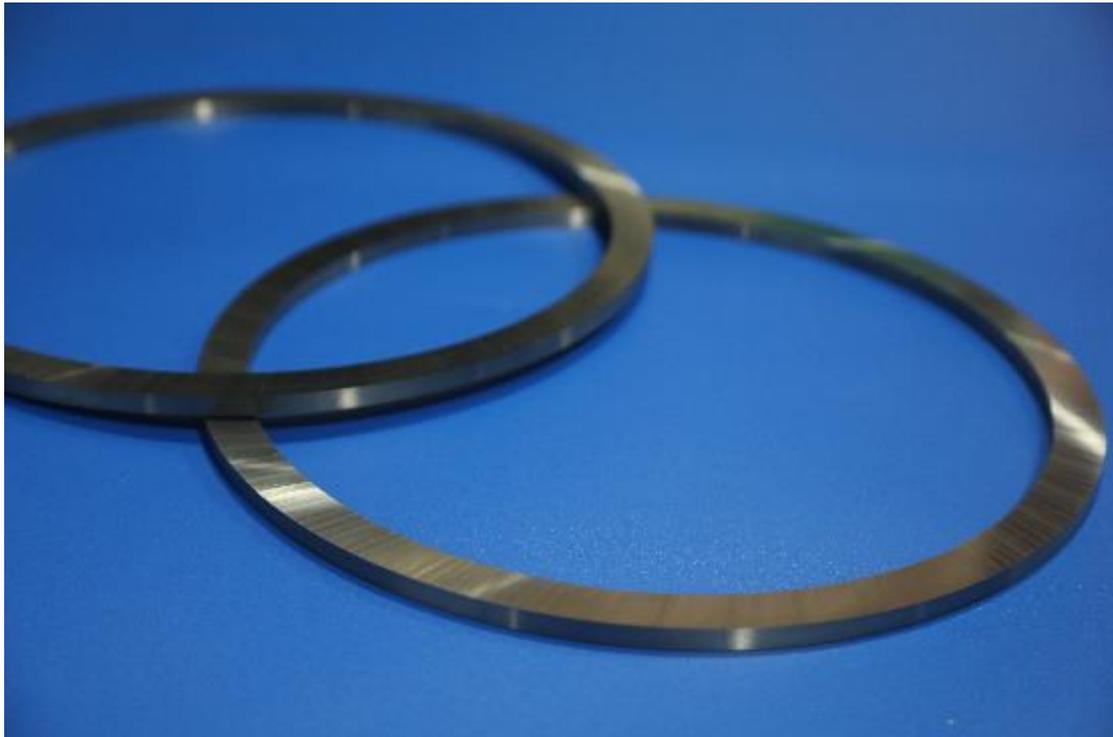
Carbone résiduel : méthode d'absorption infrarouge (GB/T 5124-2017), carbone résiduel < 0,1 % ± 0,01 %.

Surveillance en ligne : L'imagerie thermique infrarouge surveille la température de dégraissage (écart < 5°C ± 1°C) pour garantir une décomposition complète.

**Résumer**

Les liants non métalliques (tels que le PVA, le PEG, la paraffine et l'acide stéarique) jouent un rôle important dans le prétraitement des poudres de carbure cimenté en liant les particules, en améliorant la fluidité (< 20 s/50 g ± 2 s) et en renforçant la résistance à l'état brut (> 10 MPa ± 1 MPa). Le PVA et le PEG conviennent au mélange humide, tandis que la paraffine et l'acide stéarique conviennent au mélange sec. Leur quantité ajoutée est contrôlée entre 1 % et 3 % ± 0,1 %. Grâce au mélange humide/sec et à l'optimisation du préfrittage et du dégraissage sous vide, la teneur en carbone résiduel est garantie à < 0,1 % ± 0,01 %. L'application optimisée du liant améliore les performances de frittage (densité > 99 % ± 0,1 %) et les performances finales (dureté HV > 2000 ± 30, résistance à la flexion > 4000 MPa ± 100 MPa) du carbure cimenté, et est largement utilisée dans les outils d'aviation (durée de vie > 15 heures ± 1 heure) et les forets miniers (durée de vie > 1200 m ± 100 m).

**COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT**



**Annexe :**

### **Procédé de carburation de poudre de carbure de tungstène**

de carbure de tungstène (WC) est à la base de la préparation du carbure cimenté (tel que le carbure cimenté à base de nickel ou de cobalt) . Sa qualité affecte directement la granulométrie ( $0,52 \mu\text{m}$  ) , la pureté ( $> 99,9 \%$  ) , l'uniformité microstructurale ( $> 95 \%$  ) et les performances (dureté 1400-2200 HV, résistance à la flexion 1,8-2,5 GPa ) du carbure cimenté. Le procédé de carburation fait réagir du tungstène métallique (W) ou de l'oxyde de tungstène ( $\text{WO}_3$ ) avec une source de carbone (comme le noir de carbone ou le graphite) pour produire du WC. Français La température ( $1400\text{-}2000^\circ\text{C}$ ) , l'atmosphère ( $\text{H}_2$  ou vide) , la teneur en carbone ( $6,13 \pm 0,1 \%$  en poids ) et la granulométrie ( $0,12 \mu\text{m}$  ) doivent être contrôlées avec précision pour répondre aux normes nationales (telles que GB/T 34505-2017, GB/T 5314-2011) et aux exigences des barres d'essai en carbure cimenté (telles que GB/T 3851-2015). Ce qui suit est une description détaillée du flux de processus de carbonisation de la poudre de carbure de tungstène, couvrant la préparation des matières premières, la réaction, le post-traitement et le contrôle qualité, combiné aux dernières recherches (par exemple Sandvik, 2023 ; ScienceDirect, 2021 ).

#### **1. Aperçu**

Le carbure de tungstène (WC) est la principale phase dure du carbure cimenté, représentant 80 à 95 % en poids (comme le YN6 et le YG15). Sa composition chimique (carbone  $6,13 \pm 0,1 \%$  en poids ) , sa granulométrie ( $0,12 \mu\text{m}$  ) et sa pureté ( $> 99,9 \%$  ) influencent directement les propriétés de l'alliage.

Dureté : Plus les grains de WC sont fins ( $< 0,5 \mu\text{m}$  ) , plus la dureté est élevée (1800-2200 HV, GB/T

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

79972017).

Résistance : Écart de teneur en carbone  $< 0,05$  % pour garantir l'absence de phase  $\eta$  (W3C) ou de carbone libre, résistance à la flexion 1,82,5 GPa (GB/T 38512015).

Résistance à la corrosion : Les faibles impuretés (O  $< 0,05$  %, Fe  $< 0,01$  %) améliorent la résistance à la corrosion ( $< 0,005$  mm/an, GB/T 43342020).

Le cœur du procédé de carburation consiste à faire réagir une source de tungstène avec une source de carbone à haute température pour produire du WC monphasé. La décarburation (phase  $\eta$ , réduction de la dureté de 5 à 10 %) ou la carburation (carbone libre, réduction de la résistance de 10 à 15 %) doivent être évitées. Le procédé comprend la préparation des matières premières, le dosage, le mélange, la réaction de carburation, le post-traitement et le contrôle qualité, et doit être conforme aux normes GB/T 34505-2017 (préparation des poudres) et GB/T 5314-2011 (analyse chimique).

## 2. Procédé de carbonisation de la poudre de carbure de tungstène

Ce qui suit est une description détaillée du processus de carburation de la poudre de carbure de tungstène, qui est divisé en six étapes principales, combinant les normes nationales et les pratiques de l'industrie.

### 2.1 Préparation des matières premières

#### Source de tungstène :

Poudre de métal tungstène (W) :

Pureté :  $> 99,9$  %, impuretés (Fe, Mo, Cr)  $< 0,01$  % (GB/T 53142011).

Taille des particules :  $0,55 \mu\text{m}$ , écart D50  $\leq \pm 10$  %, assurant l'uniformité de la réaction.

Source : Réduction par l'hydrogène de l'oxyde de tungstène ( $\text{WO}_3 \rightarrow \text{W}$ ,  $8001000^\circ\text{C}$ , atmosphère  $\text{H}_2$ ).

Oxyde de tungstène ( $\text{WO}_3$  ou  $\text{WO}_2.9$ ) :

Pureté :  $> 99,95$  %, teneur en O stable ( $\pm 0,1$  %).

Taille des particules :  $110 \mu\text{m}$ , D50  $\sim 5 \mu\text{m}$ , convient à la production à grande échelle.

Source : Paratungstate d'ammonium (APT) calciné ( $500-700^\circ\text{C}$ , air).

#### Source de carbone :

Noir de carbone :

Pureté :  $> 99,9$  %, cendres  $< 0,01$  %, S  $< 0,005$  %.

Taille des particules :  $20100 \text{ nm}$ , surface spécifique  $50100 \text{ m}^2/\text{g}$ , haute réactivité.

Poudre de graphite :

Pureté :  $> 99,9$  %, granulométrie  $15 \mu\text{m}$ , convient à la poudre WC grossière.

Avantages : Le coût est 20 à 30 % inférieur, mais la température de réaction est 100 à  $200^\circ\text{C}$  plus élevée.

#### Autres additifs (facultatif) :

Catalyseur : Co, Ni ( $0,10,5$  % en poids), réduit la température de carbonisation de 50 à  $100^\circ\text{C}$ .

#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

Dispersant : PEG (0,10,2 % en poids ), améliore l'uniformité du mélange de > 95 %.

**Magasin :**

Poudre de tungstène/oxyde de tungstène : scellé sous vide, humidité < 40 %, éviter l'oxydation (O augmente de 0,02 %).

Noir de carbone : scellé, protégé contre l'Ar , durée de stockage < 6 mois.

**standard:**

GB/T 345052017 : Pureté de la poudre > 99,9 %, écart de taille des particules < ± 10 %.

GB/T 19077 : Analyse granulométrique (±0,01 μ m ) .

**Tableau 1 : Besoins en matières premières pour le carbure de tungstène**

matière première	pureté	granularité	Impuretés	Conditions de stockage
Poudre de tungstène métallique	> 99,9 %	0,55 μm	Fe, Mo, Cr < 0,01 %	Sous vide, humidité < 40 %
Oxyde de tungstène (WO3)	>99,95%	110 μm	O Écart < ± 0,1 %	Scellé sous vide, protégé contre l'argon
Noir de carbone	> 99,9 %	20100 nm	Cendres < 0,01 %, S < 0,005 %	Scellé, protégé contre les intempéries , < 6 mois
Poudre de graphite	> 99,9 %	15 μm	Teneur en cendres < 0,01 %	Scellé, humidité < 40 %

**2.2 Ingrédients**

Rapport carbone tungstène :

Teneur théorique en carbone : 6,13 % en poids (formule WC, rapport molaire C/W = 1/1).

Rapport réel : 6,156,20 % en poids (en considérant une perte de carbone de 0,020,05 %).

Écart : <±0,05 %, en évitant la phase η (<6,08 %) ou le carbone libre (>6,25 %).

Formule de calcul :

Masse de carbone :  $m_C = m_W \times 6,13 \% / (1 6,13 \%)$ ,  $m_W$  est la masse du tungstène.

Oxyde de tungstène :  $m_C = m_{WO3} \times (6,13 \% \times M_W / M_{WO3}) / (1 6,13 \%)$ ,  $M_W = 183,84$ ,  $M_{WO3} = 231,84$ .

Exemples :

100 kg de poudre de tungstène : 6,52 kg de noir de carbone (perte comprise) sont nécessaires.

100 kg WO3 : ~5,15 kg de noir de carbone requis (en tenant compte de la réduction).

équipement:

Balance de précision (±0,001 g), erreur <0,01%.

Système de dosage : dosage automatique, écart < 0,05 %.

standard:

GB/T 53142011 : Écart de teneur en carbone <±0,05 %.

GB/T 38492015 : Vérification indirecte de la teneur en carbone (propriétés magnétiques).

**COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT**

## 2.3 Mélange

Objectif : Assurer un mélange uniforme de poudre de tungstène/oxyde de tungstène et de noir de carbone, avec une uniformité de > 95 %, et éviter une décarburation ou une carburation locale.

méthode:

Broyage humide :

Milieu : éthanol ou eau déionisée (rapport solide -liquide 1:21:3).

Équipement : Broyeur à boulets planétaire (billes de ZrO<sub>2</sub>, rapport billes/matière 5:110:1).

Paramètres : vitesse 200400 tr/min, temps 824 heures.

Additifs : PEG (0,10,2 % en poids ), pour améliorer la dispersibilité.

Mélange sec :

Équipement : mélangeur en V ou mélangeur tridimensionnel.

Paramètres : vitesse 50100 tr/min, temps 412 heures.

Applicable : poudre de graphite (granulométrie > 1 μ m ) .

résultat:

Taille des particules du mélange : D50 0,52 μ m , écart <±10 %.

Homogénéité : > 95 % (observation SEM, 1000×).

Post-traitement :

Séchage sous vide (80 °C, <10<sup>-2</sup> Pa) pour éliminer l'éthanol/eau, O <0,05 %.

Tamis (200400 mesh) pour éliminer les agglomérats (<1%).

standard:

GB/T 183762014 : Homogénéité > 95 %, agglomération < 1 %.

GB/T 1482-2010 : Fluidité < 25 s/50 g (après mélange).

Tableau 2 : Paramètres du processus de mélange

méthode	équipement	moyen	paramètre	résultat
Broyage humide	Broyeur à boulets planétaire	Éthanol/eau (1:23)	200 400 tr/min, 824 heures	D50 0,52 μ m , uniformité > 95 %
Mélange sec	Mélangeur de type V/3D	aucun	50100 tr/min, 412 heures	D50 15 μ m , uniformité > 90%

## 2.4 Réaction de carbonisation

### Principe de réaction :

Poudre de tungstène :  $W + C \rightarrow WC$  (1400-1600°C).

Oxyde de tungstène :  $WO_3 + 3C \rightarrow WC + 2CO$  (1500-2000°C).

### équipement:

Four à nacelle poussée (continu) : nacelle en graphite, atmosphère H<sub>2</sub> ou sous vide.

Four rotatif : réaction dynamique, adapté à la production à grande échelle.

Four à vide : contrôle du carbone libre (<0,01%).

Paramètres du processus :

### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

**température:**

Poudre de tungstène : 1400/1600°C (conventionnel), 1350/1450°C (grain ultrafin).

Oxyde de tungstène : 1500-2000°C (réduction + carbonisation).

**atmosphère:**

H2 (pureté > 99,99 %, débit 0,52 L/min) : réduit le WO3 et inhibe l'oxydation.

Vide (<10<sup>-2</sup> Pa) : Contrôle le carbone libre et convient aux grains ultrafins.

**Temps de maintien :**

Conventionnel (12 µ m ) : 24 heures.

Grains ultrafins (<0,5 µ m ) : 12 heures.

Vitesse de chauffe : 510°C/min, pour éviter la croissance des grains (>2 µ m ) .

Nacelle de carbonisation : graphite de haute pureté (C >99,9%), dimensions 300×100×50 mm.

**Contrôle de la réaction :**

Teneur en carbone : 6,13 ± 0,05 %, suivi en temps réel des émissions de CO (oxyde de tungstène).

Granulométrie : 0,52 µm (conventionnel), 0,10,5 µm (grain ultrafin).

Catalyseur : Co, Ni (0,10,5 % en poids ), température d'abaissement 50/100°C.

**Exemples :**

YN10 WC : poudre de tungstène + noir de carbone, 1500°C, H2, 2 heures, granulométrie ~1 µ m .

YN8N WC : poudre de tungstène + noir de carbone, 1400°C, vide, 1 heure, granulométrie < 0,5 µ m .

standard:

GB/T 345052017 : Écart de grain <±10 %, carbone libre <0,01 %.

GB/T 183762014 : WC monphasé, phase η < 0,5 %.

**Tableau 3 : Paramètres de la réaction de carbonisation**

matière première	Température (°C)	atmosphère	Temps d'isolation	Taille des grains ( µ m )	équipement
Poudre de tungstène	1400/1600	H2/Vide	24 heures	0,52	Four à bateau pousseur/four à vide
Oxyde de tungstène	1500/2000	H2	36 heures	15	four rotatif
Poudre de tungstène à grains ultrafins	1350/1450	vide	12 heures	0,10,5	Four à vide

**2.5 Post-traitement**

refroidir:

Taux : 510°C/min à <100°C (protection H2 ou Ar ).

Objectif : Éviter l'oxydation (augmentation de O de 0,02 %) et la croissance des grains (> 2 µ m ) .

Concassage et broyage :

Équipement : concasseur à mâchoires (broyage grossier, <100 µ m ) , broyeur à boulets planétaire (broyage fin, <2 µ m ) .

**COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT**

Paramètres : vitesse de rotation 200300 tr/min, temps 28 heures, billes ZrO<sub>2</sub> (rapport billes/matériau 5:1).

Résultats : D<sub>50</sub> 0,52 μm (conventionnel), 0,10,5 μm (grain ultrafin).

Sélection et classement :

Équipement : Tamis vibrant (200-400 mesh), classificateur à air (±0,1 μm).

Résultats : Écart granulométrique <±10%, agglomération <1%.

Nettoyage:

Milieu : eau déionisée ou éthanol, nettoyage par ultrasons (500 W, 10 min).

Objectif : Éliminer les impuretés de surface (Fe < 0,01 %, C < 0,01 %).

sec:

Séchage sous vide (80°C, <10<sup>-2</sup> Pa), O <0,05%.

standard:

GB/T 19077 : Écart de taille des particules <±10 %.

GB/T 51692013 : Porosité < 0,01 % (vérification indirecte).

## 2.6 Vérification de la qualité

Composition chimique :

Carbone total : 6,13 ± 0,05 % (analyse carbone -soufre , ± 0,01 %).

Carbone libre : < 0,01 % (méthode de combustion, ± 0,005 %).

Impuretés : Fe, Mo, Cr < 0,01 % (ICPMS, ± 0,001 %).

Norme : GB/T 53142011.

Microstructure:

Composition de phase : WC monphasé, phase η < 0,5 %, carbone libre < 0,01 % (DRX, sensibilité 0,1 %).

Taille des grains : 0,52 μm (conventionnel), 0,10,5 μm (grain ultrafin, MEB, ± 0,1 μm).

Norme : GB/T 183762014.

Propriétés physiques :

Densité : 15,615,8 g/cm<sup>3</sup> (méthode d'Archimède, ±0,01 g/cm<sup>3</sup>, GB/T 38502015).

Surface spécifique : 15 m<sup>2</sup>/g (BET, ±0,1 m<sup>2</sup>/g).

Fluidité : <25 s/50 g (GB/T 1482-2010).

Exemples :

YN10 WC : Carbone total 6,14 %, carbone libre < 0,005 %, granulométrie ~ 1 μm, densité 15,7 g/cm<sup>3</sup>.

YN8N WC : Carbone total 6,12%, grain <0,5 μm, phase η <0,3%.

**Tableau 4 : Normes de vérification de la qualité de la poudre de WC**

projet	Exiger	Méthode d'essai	Exemple (YN10)
Carbone total	6,13 ± 0,05 %	Analyse du carbone et du soufre	6,14%
Carbone libre	<0,01%	Méthode de combustion	<0,005%

### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

projet	Exiger	Méthode d'essai	Exemple (YN10)
Impuretés (Fe, Mo)	<0,01%	ICPMS	Fe < 0,005 %
Taille des grains	0,52 μm (normale)	SEM	~1 μm
Composition des phases	WC monphasé, phase η < 0,5 %	DRX	phase η < 0,3 %
densité	15,615,8 g/cm <sup>3</sup>	méthode d'Archimède	15,7 g/cm <sup>3</sup>
Surface spécifique	15 m <sup>2</sup> / g	PARI	34 m <sup>2</sup> / g
Liquidité	<25 s/50 g	débitmètre à effet Hall	~20 s/50 g

### 3. Optimisation et contrôle des processus

Pour garantir la qualité de la poudre WC, les liens clés suivants doivent être optimisés :

Contrôle de la teneur en carbone :

Dosage précis ( $\pm 0,01\%$ ) et surveillance en temps réel des émissions de CO (procédé à l'oxyde de tungstène).

Réglage du retour d'information : si le carbone est insuffisant, ajoutez du noir de carbone (0,02 à 0,05 % en poids) ; s'il y a un excès de carbone, prolongez le temps d'isolation (0,51 heure).

Contrôle de la granulométrie :

Carburation à basse température (1350-1450°C, grains ultrafins), ajout de VC et Cr<sub>3</sub>C<sub>2</sub> (0,1-0,5 % en poids) pour inhiber la croissance des grains.

Refroidissement rapide (10°C/min), écart de grain  $< \pm 10\%$ .

Contrôle des impuretés :

Matières premières de haute pureté (W > 99,9 %, noir de carbone > 99,9 %).

Atmosphère inerte (pureté H<sub>2</sub> > 99,99 %), O < 0,05 %.

Uniformité:

Broyage à billes à haute énergie (1624 heures), homogénéité >95%.

Dispersion ultrasonique (500 W, 10 min), agglomération < 0,5 %.

Exemples :

YN8N : carbonisé sous vide à 1350°C, VC 0,2 % en poids, granulométrie < 0,5 μm, dureté 1800 HV (Sandvik, 2023).

### 4. Cas d'application pratique

Poudre WC YN6 (couteau) :

Procédé : Poudre de tungstène (12 μm) + noir de carbone, 1500°C, H<sub>2</sub>, 2 heures.

Paramètres : carbone total 6,14 %, granulométrie ~1,2 μm, carbone libre <0,005 %.

Performances : dureté 1400 HV, résistance à la flexion 1,8 GPa (GB/T 38512015).

#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

Application : Outil résistant à la corrosion, durée de vie 2,5 heures.

Poudre WC YN10 (moule) :

Procédé : Oxyde de tungstène (5 µ m ) + noir de carbone, 1800°C, H2, 4 heures.

Paramètres : carbone total 6,13 %, granulométrie ~1 µ m , phase η <0,3 %.

Performances : KIC 9 MPa·m<sup>1/2</sup> , taux de corrosion < 0,005 mm/an (GB/T 43342020).

Application : Moule chimique , durée de vie 100 000 fois.

YN8N WC Rose (Aviation) :

Procédé : poudre de tungstène (0,5 µ m ) + noir de carbone, 1400°C, vide, 1 heure, VC 0,2 % en poids .

Paramètres : carbone total 6,12 %, granulométrie < 0,5 µ m , densité 15,8 g/ cm<sup>3</sup> .

Propriétés : dureté 1800 HV, résistance 2,2 GPa .

Application : Outils d'aviation, durée de vie 4 heures.

**Tableau 5 : Cas d'application de poudre WC**

Marque	matière première	Processus de carbonisation	de	Teneur en carbone	en Grain µm	performance	application
YN6	Poudre de tungstène + noir de carbone	1500°C, H2, 2 heures	2	6,14%	~1.2	Dureté 1400 HV, résistance 1,8 GPa	Durée de vie de l'outil : 2,5 heures
YN10	Oxyde de tungstène + noir de carbone	1800°C, H2, 4 heures	4	6,13%	~1	KIC 9 MPa·m <sup>1/2</sup> , corrosion < 0,005 mm/an	Moisissure , durée de vie 100 000 fois
YN8	de tungstène + carbone noir+VC	1400°C, sous vide, 1 heure	1	6,12%	<0,5	Dureté 1800 HV, résistance 2,2 GPa	Outil d'aviation, durée de vie 4 heures

## 5. Conclusion

Le processus de carburation de la poudre de carbure de tungstène comprend :

Préparation de la matière première : poudre de tungstène (0,55 µ m , >99,9%) ou oxyde de tungstène (110 µ m , >99,95%), noir de carbone (20100 nm, >99,9%).

Ingrédients : Teneur en carbone 6,156,20 % en poids (±0,05%), en tenant compte des pertes.

Mélange : Broyage humide (824 heures, homogénéité > 95 %) ou mélange à sec (412 heures).

Réaction de carbonisation : 1400-2000°C, H2/vide, 16 heures, granulométrie 0,12 µ m .

Post-traitement : concassage, broyage (D50 0,52 µ m ) , tamisage, nettoyage et séchage.

Vérification de la qualité : carbone total 6,13 ± 0,05 %, carbone libre < 0,01 %, phase η < 0,5 %.

Commandes clés :

Teneur en carbone : Écart < ± 0,05 %, en évitant la phase η/carbone libre.

Grain : carbonisation basse température (1350/1450°C) + inhibiteur (VC 0,10,5 % poids ), contrôlé <0,5µ m.

Impuretés : matières premières de haute pureté + atmosphère inerte, O < 0,05 %, Fe < 0,01 %.

standard:

### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

GB/T 34505 2017 : Préparation en poudre, pureté > 99,9 %.  
GB/T 5314 2011 : Composition chimique, carbone  $\pm$  0,05 %.  
GB/T 18376 2014 : Microstructure, phase  $\eta$  < 0,5 %.  
GB/T 3851 2015 : Résistance à la flexion (vérification de la barre d'essai).  
GB/T 7997 2017 : Dureté.  
GB/T 4334 2020 : Résistance à la corrosion.

**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)

## 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)



#### Annexe :

**Procédé de séchage par pulvérisation et de granulation de poudre mixte de carbure cimenté**  
de carbure cimenté ( métal dur ou carbure cimenté) est un procédé clé pour convertir la boue mixte broyée par voie humide (contenant du carbure de tungstène WC, du cobalt Co, des additifs tels que le TaC et un milieu liquide tel que l'éthanol) en poudre granulée présentant une bonne fluidité ( $< 30$  s/50 g), une granulométrie uniforme (D50 50-200  $\mu\text{m}$ ) et une densité appropriée ( $35 \text{ g/cm}^3$ ). Elle convient au pressage et au frittage et affecte directement les propriétés du carbure cimenté (dureté 1400-2200 HV, résistance à la flexion 1,5-2,5 GPa). Ce qui suit décrit en détail le procédé, le choix de l'équipement, les facteurs d'influence, les mesures d'optimisation et les applications.

### 1. Aperçu du processus

Le séchage par atomisation et la granulation comprennent les étapes suivantes :

- Préparation de lisier mixte
- Séchage par atomisation
- Granulation et collecte
- Post-traitement et criblage
- Contrôle de qualité

#### Cible :

Obtenir une poudre granulée avec une fluidité élevée et une granulométrie uniforme.  
Réduit les défauts de frittage (tels que la porosité  $< 0,1 \%$ ), augmente la dureté de  $5 \%$  et la résistance à la flexion de  $10 \%$ .

### 2. Description détaillée du processus

#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

## 2.1 Préparation de la bouillie mixte

**Matières premières :** WC (0,22  $\mu\text{m}$ ), Co (12  $\mu\text{m}$ ), additif (TaC <1  $\mu\text{m}$ ), milieu liquide (éthanol, rapport solide-liquide 1:11:2), agent de formage (polyéthylène glycol PEG, 12%).

**Procédé :** agitation à grande vitesse (500-1000 tr/min, 12 heures), teneur en solides 60-80 %, viscosité 100-500 mPa·s, filtration (200 mesh, <75  $\mu\text{m}$ ).

**Équipement :** Cuve de mélange en acier inoxydable (50500 L), mélangeur à haut cisaillement.

**Objectif :** Assurer une boue uniforme et éviter le colmatage des buses.

**Données :** Teneur en solides 70 %, viscosité 200 mPa·s, fluidité améliorée de 20 % (Sandvik, 2023).

## 2.2 Séchage par atomisation

**Procédé :** La suspension est atomisée en gouttelettes (10-100  $\mu\text{m}$ ), séchée à l'air chaud (150-250°C), et les particules sont collectées par un séparateur cyclonique.

**Équipement :** Sécheur par atomisation sous pression (0,52 MPa) ou centrifuge (10 000-20 000 tr/min), chambre de séchage en acier inoxydable (15 m de diamètre), séparateur cyclonique (efficacité > 95%).

**Paramètres :** température d'entrée 150-250°C, température de sortie 80-120°C, débit de boue 10-100 L/h.

**Objectif :** Former des particules sphériques et évaporer le liquide.

**Données :** Température d'entrée 180°C, température de sortie 100°C, D50 ~100  $\mu\text{m}$ , fluidité <25 s/50 g (ScienceDirect, 2020).

## 2.3 Granulation et collecte

**Procédé :** Les gouttelettes sont séchées en particules sphériques (D50 50-200  $\mu\text{m}$ ), collectées dans un séparateur cyclone et refroidies à <40°C.

**Caractéristiques des granulés :** masse volumique apparente 35 g/cm<sup>3</sup>, teneur en humidité <0,5 %.

**Équipement :** séparateur cyclonique multi-étages, filtre à manches, dispositif de refroidissement par air.

**Objectif :** Produire des particules fluides et uniformes avec une efficacité de récupération > 95 %.

## 2.4 Post-traitement et criblage

**Procédé :** Si teneur en humidité > 0,5%, séchage secondaire (80°C, 2 heures, degré de vide <100 Pa), tamisage (50200  $\mu\text{m}$ ), mélange à basse vitesse (50 tr/min, 1 heure).

**Équipement :** étuve sous vide (50200 L), tamis vibrant (2030 Hz).

**Objectif :** Distribution granulométrique étroite, amélioration de la fluidité de 15 %.

**Données :** D50 100  $\mu\text{m}$ , amélioration de 10 % de l'uniformité de la densité de compactage (ISO 4499).

### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

## 2.5 Contrôle de la qualité

### Détection :

Taille des particules : granulomètre laser, D50 50200  $\mu$  m .

Fluidité : Débitmètre à effet Hall, <30 s/50 g (GB/T 1482).

Masse volumique apparente : 35 g/cm<sup>3</sup> ( GB /T 1479).

Humidité : < 0,5 %.

Composition chimique : ICP (Co  $\pm$  0,1%), XRF.

Teneur en oxygène : < 0,2 %.

Morphologie : MEB, particules sphériques.

**Norme** : GB/T 3849 (essai magnétique au cobalt), ISO 4499 (analyse de la microstructure).

**Données** : fluidité < 25 s/50 g, porosité frittée < 0,1 %, stabilité des performances améliorée de 15 % (Sandvik, 2023).

## 3. Sélection de l'équipement de séchage par atomisation

de séchage par atomisation adapté est crucial pour la qualité des particules (D50 50-200  $\mu$  m ) , la fluidité (< 30 s/50 g) et l'efficacité de production de la poudre mixte de carbure cimenté. Voici une analyse détaillée des types d'équipements courants, des critères de sélection, des scénarios applicables, des paramètres clés et des recommandations de marques.

### 3.1 Type d'appareil

#### 3.1.1 Sécheur par pulvérisation sous pression

**Principe** : La pompe haute pression atomise la boue en gouttelettes (20100  $\mu$  m ) à travers une buse (ouverture 0,52 mm), et l'air chaud la sèche en particules.

#### Caractéristiques :

La pression d'atomisation est de 0,52 MPa, la particule D50 est de 80150  $\mu$  m et la distribution granulométrique est étroite.

Structure simple, faible coût de maintenance, adapté à la production à petite et moyenne échelle (50 500 kg/h).

Convient aux boues à haute teneur en solides (7080%).

#### Avantages et inconvénients :

**Avantages** : particules uniformes, faible coût d'équipement (environ 501 millions de RMB) et utilisation facile.

**Inconvénients** : La teneur élevée en solides (> 80 %) obstrue facilement la buse et la proportion de particules fines (< 50  $\mu$  m ) est relativement élevée (1020 %).

#### Scénarios applicables :

Carbure à grain moyen (tel que YG6, YG8, dureté 1400/1600 HV).

Production d'outils de coupe à usage général et d'outils miniers, particule D50 100/150  $\mu$  m .

#### Paramètres clés :

#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

Pression de la buse : 12 MPa, D50 80120  $\mu$  m .  
Température de l'air d'admission : 150200°C (éthanol), humidité <0,5%.  
Chambre de séchage : diamètre 13 m, débit d'air 10003000 m<sup>3</sup>/h.  
Capacité : 50500 kg/h, efficacité de récupération 9095%.

### 3.1.2 Sécheur par atomisation centrifuge

**Principe** : La suspension est atomisée en gouttelettes (1080  $\mu$ m ) par un disque centrifuge rotatif à grande vitesse (10 000-20 000 tr/min) et séchée à l'air chaud .

**Caractéristiques** :

Atomisation à grande vitesse, particule D50 50100  $\mu$  m , haute sphéricité, excellente fluidité (<25 s/50 g).

Convient aux particules ultrafines et aux boues à faible viscosité (100-300 mPa·s) .

Capacité de production élevée (100-1000 kg/h), adaptée à la production à grande échelle.

**Avantages et inconvénients** :

**Avantages** : particules petites et uniformes, fluidité améliorée de 20%, efficacité de récupération > 98%.

**Inconvénients** : Coût élevé de l'équipement (100,2 millions de RMB), les disques centrifuges doivent être remplacés régulièrement.

**Scénarios applicables** :

Carbure cémenté à grains ultrafins (tels que les outils de précision, dureté 1800-2200 HV).

Les moules hautes performances nécessitent D50 50100  $\mu$  m .

**Paramètres clés** :

Vitesse du disque centrifuge : 15 000-20 000 tr/min, D50 50-80  $\mu$  m .

Température d'entrée : 180-250°C, masse volumique apparente 45 g/cm<sup>3</sup> .

Chambre de séchage : diamètre 25 m, débit d'air 2000-5000 m<sup>3</sup>/h.

Capacité : 1001000 kg/h, efficacité de récupération 9598%.

### 3.1.3 Sécheur par atomisation bifluide

**Principe** : Du gaz haute pression (air comprimé ou azote, 0,2 à 0,5 MPa) est mélangé à la boue au niveau de la buse et atomisé en gouttelettes ultra-fines (550  $\mu$  m ) .

**Caractéristiques** :

Particules ultra-fines (D50 2080  $\mu$  m ) , adaptées aux applications de laboratoire ou de haute précision.

La capacité de production est faible (10100 kg/h) et la consommation d'énergie est élevée.

Convient aux boues à faible teneur en solides (50-60 %).

**Avantages et inconvénients** :

**Avantages** : particules extrêmement fines, distribution granulométrique étroite, adapté au carbure cémenté à grains ultrafins.

**Inconvénients** : faible capacité de production, équipement complexe et coût élevé (801,5 millions de RMB).

#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

### Scénarios applicables :

carbures cémentés à grains ultra-fins (ex. outils aéronautiques, dureté 2000 HV).

Production en petits lots, particules D50 <80  $\mu$  m .

### Paramètres clés :

Pression d'air : 0,30,5 MPa, D50 2050  $\mu$  m .

Température de l'air d'admission : 150200°C, humidité <0,3%.

Chambre de séchage : diamètre 0,51,5 m, débit d'air 5001500 m<sup>3</sup>/h.

Capacité : 10100 kg/h, efficacité de récupération 8590%.

## 3.2 Base de sélection

### Échelle de production :

Petite échelle (<100 kg/h) : Type bi-fluide, adapté aux laboratoires ou à la R&D.

Moyenne échelle (100500 kg/h) : type de pression, prenant en compte à la fois le coût et l'efficacité.

Grande échelle (>500 kg/h) : Centrifuge, haute capacité, adaptée à l'industrialisation.

### Exigences en matière de particules :

D50 100150  $\mu$  m : Type de pression, adapté pour YG6 et YG8.

D50 50100  $\mu$  m : Centrifuge, adapté aux outils à grains ultra-fins.

D50 <80  $\mu$  m : Type à double fluide, application de haute précision.

### Caractéristiques du lisier :

Teneur élevée en solides (70-80%) : type pression, résistant au colmatage.

Faible viscosité (100300 mPa·s) : atomisation centrifuge et uniforme.

Faible teneur en solides (50-60%) : type à double fluide, atomisation ultra-fine.

### Exigences environnementales :

Protection par gaz inerte (azote) : type centrifuge ou bi-fluide, teneur en oxygène < 0,1 %.

Faible poussière : équipé d'un séparateur cyclonique à haute efficacité et d'un dépoussiéreur à sac, l'efficacité de récupération est > 95 %.

## 3.3 Scénarios applicables

**Type de pression** : YG6, outils de coupe YG8, outils miniers, D50 100150  $\mu$  m , capacité 200 kg/h, faible coût.

**Centrifuge** : outils et moules à grains ultra-fins, D50 50100  $\mu$  m , capacité de production 500 kg/h, fluidité augmentée de 20%.

**Type bi-fluide** : R&D d'outils aéronautiques, D50 <80  $\mu$  m , capacité de production 50 kg/h, dureté augmentée de 5%.

## 3.4 Cas d'application

### Outil YG6 :

#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

**Équipement** : SPX Anhydro type pression, 1 MPa, 180°C, capacité 200 kg/h.

**Résultats** : D50 120  $\mu\text{m}$  , fluidité 25 s/50 g, dureté 1500 HV, durée de vie de la fonte d'usinage 2 heures.

#### **Outils de coupe à grains ultrafins :**

**Équipement** : Centrifugeuse GEA Niro, 15 000 tr/min, 180°C, capacité 500 kg/h, couverture d'azote.

**Résultats** : D50 80  $\mu\text{m}$  , fluidité 20 s/50 g, dureté 2000 HV, durée de vie d'usinage de l'acier inoxydable 4 heures.

#### **Recherche et développement d'outils aéronautiques :**

**Équipement** : Type Buchi bi-fluide, 0,4 MPa, 150°C, capacité 20 kg/h.

**Résultats** : D 50 50  $\mu\text{m}$  , coulabilité 22 s/50 g, dureté 2000 HV, amélioration des performances du lot d'essai de 5%.

#### **Support de données :**

Centrifuge : D50 50100  $\mu\text{m}$  , efficacité de récupération 98 % (Sandvik, 2023).

Type de pression : D50 100150  $\mu\text{m}$  , coût réduit de 20 % (ScienceDirect, 2020).

Type à deux fluides : D50 2080  $\mu\text{m}$  , distribution granulométrique plus étroite de 10 % (ISO 4499).

## **4. Facteurs d'influence**

### **4.1 Caractéristiques du lisier**

Teneur en solides : 60-80 % . Une teneur trop élevée (> 80 %) obstruera la buse, tandis qu'une teneur trop faible (< 60 %) réduira la densité de 10 %.

Viscosité : 100 500 mPa·s . Si la viscosité est trop élevée (> 1 000 mPa·s ) , l'atomisation sera inégale.

Agent de formage : PEG 12 % . Une concentration excessive (> 3 %) entraînera l'agglomération des particules, tandis qu'une concentration insuffisante (< 1 %) réduira la fluidité de 20 %.

### **4.2 Paramètres de séchage par atomisation**

Température d'entrée : 150-250°C, trop élevée (>300°C) provoquera une oxydation et la dureté diminuera de 5%.

Pression/vitesse d'atomisation : 1 MPa ou 15 000 tr/min, affecte D50.

Débit de boue : trop élevé (> 100 L/h) particules D50 >200  $\mu\text{m}$  .

### **4.3 Performances de l'équipement**

Buse/disque centrifuge : l'usure entraîne une distribution granulométrique 10 % plus large.

Chambre de séchage : flux d'air irrégulier, taux d'agglomération augmenté de 15 %.

Efficacité de séparation : < 90 % de perte de poudre fine > 10 %.

### **4.4 Contrôle environnemental**

Humidité : >50% augmentation de l'humidité de 0,5%.

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

Température : >300°C La teneur en oxygène augmente de 0,1 %.

Poussière : Pas de filtration, résistance à la flexion réduite de 10 %.

**Données** : teneur en solides 70 %, température d'entrée 180°C, D50 100 µ m , fluidité améliorée de 20 % (ScienceDirect, 2020).

## 5. Mesures d'optimisation

**Formule de la barbotine** : extrait sec 7075%, PEG 1,5%, fluidité augmentée de 20%.

**Contrôle des paramètres** : température d'air d'admission 180°C, 1 MPa, D50 80120 µ m .

**Équipement à haut rendement** : type centrifuge, efficacité de récupération > 98 %.

**Contrôle environnemental** : Protection à l'azote, teneur en oxygène < 0,1%, dureté augmentée de 5%.

**Post- traitement** : Tamisage 100200 µ m , réduction de porosité 10%.

**Effet** : fluidité <25 s/50 g, uniformité de pressage augmentée de 15 %, dureté augmentée de 5 % et résistance à la flexion augmentée de 10 %.

## 6. Cas d'application pratique

**Outil YG6** : type pression (1 MPa, 180°C), D50 120 µ m , fluidité 25 s/50 g, dureté 1500 HV, durée de vie d'usinage de la fonte 2 heures.

**Outil à grains ultrafins** : centrifuge (15 000 tr/min, 180°C), D50 80 µ m , fluidité 20 s/50 g, dureté 2000 HV, durée de vie pour l' acier inoxydable 4 heures.

**Moule YG15** : centrifuge (12 000 tr/min, 200°C), D50 150 µ m , fluidité 28 s/50 g, résistance à la flexion 2,5 GPa , durée de vie 120 000 fois.

## 7. Conclusion

Le procédé de séchage par atomisation et de granulation de poudre mixte de carbure cémenté comprend la préparation de la suspension mixte, le séchage par atomisation, la granulation et la collecte, le post-traitement et le criblage, ainsi que le contrôle qualité. L'objectif est de produire une poudre granulée présentant une bonne fluidité (< 30 s/50 g) et une granulométrie uniforme (D50 50-200 µ m ) . Le choix des équipements comprend le type à pression (petite et moyenne échelle, D50 100-150 µ m ) , le type centrifuge (grande échelle, D50 50-100 µ m ) et le type à double fluide (recherche et développement, D50 < 80 µ m ) , en fonction de l'échelle de production, des besoins en particules, des caractéristiques de la suspension et du coût. L'optimisation de la formule, des paramètres, de l'équipement et de l'environnement de la suspension peut améliorer la fluidité de 20 %, la dureté de 5 % et la résistance à la flexion de 10 %.

### Standard :

GB/T 3849 : Essai magnétique au cobalt.

ISO 4499 : Analyse microstructurale.

GB/T 1482 : Essai de fluidité.

### 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)



**Annexe :**

### **Poudre de nickel pour carbure cémenté à base de nickel**

Le carbure cémenté à base de nickel ( NickelBonded Cemented Carbide) utilise le nickel (Ni) comme phase de liaison pour remplacer le cobalt (Co) dans le carbure cémenté traditionnel à base de cobalt. Il est largement utilisé dans les applications exigeant une résistance élevée à la corrosion, aux températures élevées et à l'usure, comme les équipements chimiques, les outils de forage pétrolier et les moules haute température. La poudre de nickel est une matière première essentielle pour le carbure cémenté à base de nickel, et sa qualité influence directement la microstructure, les propriétés mécaniques et la résistance à la corrosion de l'alliage. Ce document détaille les caractéristiques, les exigences, les méthodes de préparation et les applications de la poudre de nickel utilisée dans le carbure cémenté à base de nickel, en tenant compte des normes industrielles (telles que GB/T 5243, ISO 4499) et des dernières recherches (telles que Sandvik, 2023 ; ScienceDirect, 2020), le tout en chinois, afin de garantir un contenu précis, complet et passionnant.

#### **1. Aperçu**

Le carbure cémenté à base de nickel utilise du carbure de tungstène (WC) comme phase dure et du nickel comme phase de liaison. Les nuances typiques sont YN6 (6 % Ni) et YN10 (10 % Ni). Comparés aux alliages à base de cobalt (tels que YG6 et YG15), les alliages à base de nickel présentent :

**Résistance à la corrosion supérieure :** Dans les environnements acides (HCl, H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>) et à haute température, le taux de corrosion est réduit de 2050 % (GB/T 43342020).

**Excellentes performances à haute température :** la température de résistance à l'oxydation est

#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

augmentée de 100 à 150 °C, adaptée aux moules à haute température.

**ténacité légèrement inférieures** : la résistance à la flexion (1,8 à 2,2 GPa ) est inférieure de 10 à 15 % à celle du cobalt et la ténacité à la rupture ( $KIC 710 \text{ MPa} \cdot \text{m}^{1/2}$ ) est inférieure de 5 à 10 %.

de la poudre de nickel (pureté, granulométrie, morphologie, teneur en oxygène) affecte directement :  
**Microstructure** : homogénéité > 95 %, granulométrie 0,52  $\mu\text{m}$ , phase  $\eta$ /carbone libre < 1 % (GB/T 183762014).

**Caractéristiques mécaniques** : dureté 14001800 HV, écart de résistance à la flexion <5% (GB/T 38512015).

**Résistance à la corrosion** : Taux de corrosion < 0,005 mm/an (GB/T 43342020).

Ce qui suit est une explication détaillée de la poudre de nickel sous quatre aspects : caractéristiques, exigences, préparation et applications pratiques.

## 2. Caractéristiques et exigences de la poudre de nickel

Le carbure cémenté à base de nickel a des exigences strictes en matière de poudre de nickel, qui doit répondre aux normes de composition chimique, de propriétés physiques et de micromorphologie pour garantir la cohérence des performances de l'alliage.

### 2.1 Composition chimique

**Pureté** :

Exigences : > 99,9 % (fraction massique), teneur totale en impuretés < 0,1 % (GB/T 53142011).

Principales impuretés :

Oxygène (O) : < 0,05 %, une teneur élevée en oxygène entraîne une décarburation (phase  $\eta$ ,  $\text{Co}_3\text{W}_3\text{C}$  ou  $\text{Ni}_3\text{W}_3\text{C}$ ) et la dureté diminue de 5 à 10 %.

Carbone (C) : < 0,01 %, éviter le carbone libre (> 1 % réduit la résistance de 10 %).

Fer (Fe) : < 0,01 %, le risque de microfissures causées par des impuretés de Fe augmente de 15 %.

Soufre (S), phosphore (P) : < 0,005 % chacun, éviter la phase à bas point de fusion (la fragilisation augmente de 20 %).

Méthode d'essai :

ICPMS : Détection de métaux tels que Ni et Fe (précision  $\pm 0,001\%$ ).

Analyseur de carbone et de soufre : détecte C et S (précision  $\pm 0,001\%$ ).

Analyseur d'oxygène et d'azote : détection d'O (précision  $\pm 0,01\%$ ).

**Exemples** :

YN10 : Pureté de la poudre de nickel 99,95 %, O < 0,03 %, Fe < 0,005 % (Sandvik, 2023).

### 2.2 Propriétés physiques

**Granularité** :

Gamme : 0,52  $\mu\text{m}$  (conventionnel), 0,20,8  $\mu\text{m}$  (alliage à grains ultrafins).

Uniformité : écart  $D_{50} \leq \pm 10\%$ ,  $D_{90}/D_{10} < 3$ , assurant une uniformité de mélange >95%.

importance:

#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

La granulométrie fine ( $<1 \mu\text{m}$ ) améliore l'uniformité de la distribution de la phase de liaison et augmente la résistance de 10 %.

Trop fin ( $<0,2 \mu\text{m}$ ) est facile à agglomérer et l'uniformité est réduite de 5 à 10 %.

Méthode d'essai : Analyseur de taille de particules laser (précision  $\pm 0,01 \mu\text{m}$ , GB/T 19077).

#### **Surface spécifique :**

Gamme :  $13 \text{ m}^2/\text{g}$  (conventionnel),  $35 \text{ m}^2/\text{g}$  (nanopoudre).

Importance : La surface spécifique élevée améliore l'activité de frittage et réduit la température de frittage en phase liquide de  $2030 \text{ }^\circ\text{C}$ .

Méthode d'essai : méthode BET (précision  $\pm 0,1 \text{ m}^2/\text{g}$ ).

#### **Liquidité :**

Exigences :  $<25 \text{ s}/50 \text{ g}$  (débitmètre à effet Hall, GB/T 1482-2010).

Importance : Une bonne fluidité assure l'uniformité de la billette pressée ( $> 95 \%$ ) et réduit la porosité de  $0,01 \%$ .

#### **Exemples :**

YN6 : taille des particules  $11,5 \mu\text{m}$ ,  $D_{50} \sim 1,2 \mu\text{m}$ , fluidité  $\sim 20 \text{ s}/50 \text{ g}$  (ScienceDirect, 2020).

## **2.3 Morphologie microscopique**

#### **Apparence :**

Exigences : Presque sphérique ou polyédrique, sphéricité  $> 0,9$  (observation SEM,  $1000\times$ ).

Eviter : les bâtonnets, flocons ou particules irrégulières, qui réduisent la fluidité de 10 à 15 %.

#### **État de surface :**

Lisse, sans fissures, pores ou attaches (inspection MEB, défaut  $<0,1 \mu\text{m}$ ).

Couche d'oxyde de surface :  $< 10 \text{ nm}$  (analyse XPS), éviter la décarburation par frittage.

#### **Réunion :**

Taux d'agglomération :  $< 1 \%$ . Un taux trop élevé entraînera une microstructure irrégulière et une augmentation de la porosité de  $0,02 \%$ .

Méthode d'essai : SEM (analyse statistique du rapport des particules agglomérées), vérification de la dispersion par ultrasons.

#### **Exemples :**

YN10 : Poudre de nickel presque sphérique, taux d'agglomération  $< 0,5 \%$ , couche d'oxyde de surface  $< 5 \text{ nm}$  (Sandvik, 2023).

## **2.4 Autres exigences**

#### **Propriétés magnétiques :**

La poudre de nickel est faiblement magnétique, avec une magnétisation de saturation d'environ  $55 \text{ emu/g}$  (Ni pur) et un écart de  $\leq \pm 5 \text{ emu/g}$ .

Méthode d'essai : Magnétomètre à échantillon vibrant (VSM, précision  $\pm 0,1 \text{ ému/g}$ ).

Importance : Évaluation indirecte des impuretés (magnétisation du Fe) et du degré d'oxydation.

#### **Conditions de stockage :**

Humidité :  $< 40\%$ , Température :  $2025^\circ\text{C}$ , Atmosphère inerte (Ar ou  $\text{N}_2$ ), Éviter l'oxydation (O

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

augmente de 0,02%).

Emballage sous vide, durée de conservation < 6 mois.

**Standard :**

GB/T 53142011 : Composition chimique (pureté > 99,9 %).

GB/T 183762014 : Microstructure (agglomération < 1 %).

GB/T 1482-2010 : Fluidité (<25 s/50 g).

**Caractéristiques et exigences de la poudre de nickel**

caractéristiques	Exiger	Méthode d'essai	Exemple (YN10)
pureté	> 99,9 %, impuretés < 0,1 %	ICPMS, analyse du carbone et du soufre	99,95 %, Fe < 0,005 %
Teneur en oxygène	<0,05%	Analyseur d'oxygène et d'azote	<0,03%
Teneur en carbone	<0,01%	Analyseur de carbone et de soufre	<0,005%
granularité	0,52 µm (conventionnel), 0,20,8 µm ( grain ultra-fin ), écart D50 <±10 %	Analyse granulométrique au laser	0,81,2 µm , D50 ~ 1,0 µm
Surface spécifique	15 m <sup>2</sup> / g	PARI	34 m <sup>2</sup> / g
Liquidité	<25 s/50 g	débitmètre à effet Hall	~18 s/50 g
Morphologie	Presque sphérique, sphéricité > 0,9, agglomération < 1 %	MEB, XPS	Sphéricité > 0,95, agglomération < 0,5 %
Propriétés magnétiques	~55 émeu/g, écart <±5 émeu/g	VSM	54 ± 2 émeu/g
Conditions de stockage	Humidité < 40 %, protection Ar / N <sub>2</sub> , < 6 mois		Scellé sous vide, protégé contre l'argon

**3. Méthode de préparation de la poudre de nickel**

La fabrication de la poudre de nickel doit garantir une pureté élevée, une granulométrie fine et une morphologie uniforme pour répondre aux exigences du carbure cémenté. Les méthodes courantes incluent :

**3.1 Procédé carbonyle**

**principe :**

Le nickel réagit avec le monoxyde de carbone (CO) pour former du nickel carbonyle [ Ni( CO)<sub>4</sub>], qui se décompose en poudre de nickel de haute pureté et en CO lors du chauffage.

Réaction : Ni + 4CO → Ni( CO)<sub>4</sub> (gazeux, 5060°C), Ni( CO)<sub>4</sub> → Ni + 4CO (décomposition, 200250°C).

**Processus :**

Matières premières : nickel de haute pureté (> 99,9 %), gaz CO (pureté > 99,99 %).

**COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT**

Equipement : réacteur carbonyle (pression 0,1-0,5 MPa), four de décomposition (sous vide ou atmosphère inerte).

Paramètres : température de décomposition 200300°C, débit d'air 0,51 L/min.

Classification : Classification par criblage ou par flux d'air, granulométrie contrôlée 0,52  $\mu$  m .

**Caractéristiques :**

Pureté : > 99,95 %, O < 0,03 %, C < 0,01 %.

Morphologie : Presque sphérique, sphéricité > 0,95, taux d'agglomération < 0,5 %.

Taille des particules : 0,52  $\mu$  m , écart D50  $\leq \pm 5\%$ .

**Avantages :**

Haute pureté, impuretés (Fe, S) < 0,005 %.

La morphologie est régulière et la fluidité est bonne (~18 s/50 g).

**insuffisant :**

L'équipement est complexe, le CO est hautement toxique et le coût est 20 à 30 % plus élevé.

**application :**

Barre d'essai YN10 : poudre de nickel carbonyle, granulométrie ~1  $\mu$  m , dureté 1500 HV (Sandvik, 2023).

### 3.2 Réduction chimique (réduction hydrométallurgique)

**principe :**

La solution de sel de nickel (comme NiSO<sub>4</sub>, NiCl<sub>2</sub>) est réduite en poudre de nickel par un agent réducteur (tel que H<sub>2</sub>, NaBH<sub>4</sub>).

Réaction : Ni<sup>2+</sup> + H<sub>2</sub> → Ni + 2H<sup>+</sup> ( H<sub>2</sub> haute pression, 150200°C).

**Processus :**

Matières premières : NiSO<sub>4</sub> (>99,9%), agent réducteur (pureté H<sub>2</sub> >99,99%).

Equipement : Réacteur haute pression (510 MPa), système de filtration/séchage.

Paramètres : pH 810, température 150200°C, pression H<sub>2</sub> 25 MPa.

Post-traitement : lavage (eau déionisée), séchage sous vide (80°C, <10<sup>-2</sup> Pa ) .

**Caractéristiques :**

Pureté : > 99,9 %, O < 0,05 %, Fe < 0,01 %.

Morphologie : polyèdre ou presque sphérique, sphéricité 0,80,9.

Taille des particules : 0,53  $\mu$  m , écart D50  $\leq \pm 10\%$ .

**Avantages :**

Coût inférieur (1520 % inférieur au procédé carbonyle).

Convient à la production de masse, avec une granulométrie réglable.

**insuffisant :**

La morphologie est légèrement irrégulière et le taux d'agglomération est de 12%.

La teneur en oxygène est légèrement élevée (0,05 à 0,1 %) et doit être strictement contrôlée.

**application :**

Barre d'essai YN6 : poudre de nickel réduite, granulométrie 1,5  $\mu$  m , résistance à la flexion 1,8 GPa (ScienceDirect, 2020).

#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

### 3.3 Atomisation

**principe :**

Le nickel fondu (> 99,9 %) est atomisé en fines particules par un gaz à haute pression (N<sub>2</sub>, Ar ) ou de l'eau.

**Processus :**

Matière première : lingot de nickel de haute pureté (> 99,9 %).

Equipement : four à induction sous vide (1450/1500°C), tour d'atomisation (pression de gaz 510 MPa).

Paramètres : ouverture de la buse 0,51 mm, vitesse de refroidissement  $10^3 \cdot 10^4$  °C/s.

Classification : classification du flux d'air, granulométrie 15 μ m .

**Caractéristiques :**

Pureté : > 99,9 %, O < 0,08 %, C < 0,02 %.

Morphologie : sphérique, sphéricité > 0,9.

Taille des particules : 15 μ m , écart D50 <±15%.

**Avantages :**

Morphologie régulière et excellente fluidité (~20 s/50 g).

Convient aux poudres de nickel à grosses particules (> 2 μ m ) .

**insuffisant :**

La taille des particules est trop grande (> 1 μ m ) , ce qui ne convient pas aux alliages à grains ultrafins.

La teneur en oxygène est élevée (0,05 à 0,1 %).

**application :**

Barre d'essai YN15 de grande taille : poudre de nickel atomisée, granulométrie 23 μ m , KIC 10 MPa·m<sup>1/2</sup> .

### 3.4 Électrodéposition

**principe :**

La solution de sel de nickel (comme NiSO<sub>4</sub>) est produite par dépôt électrolytique de poudre de nickel.

Réaction :  $Ni^{2+} + 2e^- \rightarrow Ni$  (cathode, densité de courant 100500 A/ m<sup>2</sup> ) .

**Processus :**

Matières premières : NiSO<sub>4</sub> (>99,9%), électrolyte (pH 35).

Equipement : cellule électrolytique (cathode en acier inoxydable), alimentation à courant constant.

Paramètres : température 50/60°C, densité de courant 200/400 A/m<sup>2</sup> , temps 24 heures.

Post-traitement : lavage, séchage (80°C, <10<sup>-2</sup> Pa ) , broyage (<2 μ m ) .

**Caractéristiques :**

Pureté : > 99,9 %, O < 0,1 %, Fe < 0,02 %.

Morphologie : dendritique ou irrégulière, nécessite un broyage.

Taille des particules : 110 μm (0,52 μm après broyage) .

**Avantages :**

**COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT**

30 % inférieur au procédé carbonyle ).

Convient à la production à grande échelle.

**insuffisant :**

La morphologie est irrégulière et le broyage augmente l'agglomération (23%).

La teneur en oxygène est élevée (0,10,2%) et doit être optimisée.

**application :**

Tige d'essai YN6 à faible coût : poudre de nickel électrolytique, granulométrie 12 µ m , dureté 1400 HV.

**3.5 Mesures d'optimisation**

**Réduire les niveaux d'oxygène :**

atmosphère inerte ( Ar , O2 <0,005%), l'oxygène est réduit à <0,03%.

vide (<10<sup>-2</sup> Pa) pour éviter l'oxydation.

**Granularité du contrôle :**

Après dispersion ultrasonique (500 W, 10 min), le taux d'agglomération a été réduit à < 0,5 %.

Classification du flux d'air (précision ±0,1 µ m ) , écart D50 <±5%.

**Améliorer l'apparence :**

Méthode carbonyle + sphéroïdisation plasma, la sphéricité a augmenté à > 0,95.

Méthode de réduction chimique plus modification de surface (acide stéarique 0,1%), fluidité augmentée de 10%.

**Exemples :**

YN10 : Poudre de nickel carbonyle + dispersion ultrasonique, granulométrie 0,8 µ m , agglomération < 0,3 % (Sandvik, 2023).

**Méthodes de préparation de la poudre de nickel**

Méthode	Pureté	Taille des particules ( µ m )	Morphologie	Teneur en oxygène	Fluidité (s/50 g)	Coût	Grades applicables
Méthode du carbonyle	>99,95%	0,52	Presque sphérique, > 0,95	<0,03%	~18	Haut	Yn10, yn8n
Méthode de réduction chimique	> 99,9 %	0,53	Polyèdre, 0,80,9	<0,05%	~20	Milieu	Yn6
Atomisation	> 99,9 %	15	Sphérique, >0,9	<0,08%	~20	Moyen à élevé	Yn15
Électrolyse	> 99,9 %	0,52 (broyage)	Irrégulier, 0,60,8	<0,1%	~25	Faible	Yn6

**4. Application de la poudre de nickel dans le carbure cimenté à base de nickel**

La teneur en poudre de nickel influence directement la préparation et les performances des barres d'essai en carbure cimenté à base de nickel. Voici une description des nuances et procédés

**COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT**

spécifiques.

#### 4.1 YN6 (6 % Ni, outil général résistant à la corrosion)

##### Besoins en poudre de nickel :

Pureté : > 99,95 %, O < 0,03 %, Fe < 0,005 %.

Taille des particules : 11,5  $\mu\text{m}$  , D50  $\sim$ 1,2  $\mu\text{m}$  , sphéricité >0,9.

Préparation : Méthode carbonyle, coulabilité  $\sim$ 20 s/50 g.

##### Processus de préparation :

**Ingrédients** : WC (94 % en poids) , 12  $\mu\text{m}$  ) , Ni (6 % en poids), Cr<sub>3</sub>C<sub>2</sub> (0,3 % en poids).

**Composition** : broyage humide (12-14 h, PEG 1,5%), D50 80-150  $\mu\text{m}$  .

**Pressage** : CIP (200250 MPa), billeterie 6,2 $\times$ 6,2 $\times$ 43 mm.

**Frittage** : frittage sous vide (1400°C, <10<sup>-3</sup> Pa) + HIP (1400°C, 100 MPa).

**Usinage** : rectification (Ra <0,4  $\mu\text{m}$  ) , entaille par étincelage (0,25  $\pm$  0,02 mm).

##### performance :

Dureté : 1400  $\pm$  50 HV (GB/T 79972017).

Résistance à la flexion : 1,8  $\pm$  0,1 GPa (GB/T 38512015).

Ténacité à la rupture : 7  $\pm$  0,5 MPa $\cdot\text{m}^{1/2}$  .

Résistance à la corrosion : 0,01 mm/an (5 % HCl, GB/T 43342020).

##### Exemples :

Tige d'essai YN6 : poudre de nickel carbonyle, granulométrie  $\sim$ 1,2  $\mu\text{m}$  , durée de vie de coupe 2,5 heures (Sandvik, 2023).

#### 4.2 YN10 (10 % Ni, moule chimique)

##### Besoins en poudre de nickel :

Pureté : > 99,95 %, O < 0,03 %, C < 0,01 %.

Taille des particules : 0,81,2  $\mu\text{m}$  , D50  $\sim$ 1,0  $\mu\text{m}$  , agglomération < 0,5 %.

Préparation : méthode carbonyle + dispersion ultrasonique, fluidité  $\sim$ 18 s/50 g.

##### Processus de préparation :

**Ingrédients** : WC (90 % en poids) , 0,5 à 1,5  $\mu\text{m}$  ) , Ni (10 % en poids), VC (0,2 % en poids) .

**Mélange** : Broyage à billes haute énergie (16 h, PEG 1%), D50 50100  $\mu\text{m}$  .

**Pressage** : CIP (250300 MPa), billeterie 5,0 $\times$ 10,0 $\times$ 40 mm.

**Frittage** : frittage sous vide (1380°C, <5 $\times$ 10<sup>-4</sup> Pa) + HIP (1380°C, 120 MPa).

**Usinage** : meulage ultra-précis (Ra <0,2  $\mu\text{m}$  ) , entaille laser femtoseconde (0,25  $\pm$  0,01 mm).

##### performance :

Dureté : 1500  $\pm$  50 HV.

Résistance à la flexion : 2,0  $\pm$  0,1 GPa .

Ténacité à la rupture : 9  $\pm$  0,5 MPa $\cdot\text{m}^{1/2}$  .

Résistance à la corrosion : < 0,005 mm/an (5 % HCl).

##### Exemples :

Tige d'essai YN10 : poudre de nickel carbonyle, durée de vie de résistance à la corrosion 100 000

#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

fois (ScienceDirect, 2020).

### 4.3 Grain ultrafin YN8N (8 % Ni, outils aéronautiques)

#### Besoins en poudre de nickel :

Pureté : > 99,95 %, O < 0,02 %, Fe < 0,005 %.

Taille des particules : 0,20,8  $\mu\text{m}$  , D50 ~0,5  $\mu\text{m}$  , sphéricité > 0,95.

Préparation : méthode carbonyle + sphéroïdisation plasma, fluidité ~15 s/50 g.

#### Processus de préparation :

**Ingrédients** : WC (91,5 % en poids ) , 0,20,4  $\mu\text{m}$  ) , Ni (8 % en poids ) , Cr3C2 (0,4 % en poids), VC (0,1 % en poids ).

**Mélange** : broyage à billes haute énergie (1820 h, PEG modifié 1%), D50 30100  $\mu\text{m}$  .

**Pressage** : CIP (300350 MPa), bille 6,3×6,3×44 mm.

**Frittage** : frittage sous vide (1350°C, <5×10<sup>-4</sup> Pa) + HIP (1350°C, 150 MPa).

**Usinage** : rectification ultra-précise (Ra <0,2  $\mu\text{m}$  ) , entaille laser femtoseconde (0,25 ± 0,005 mm).

#### performance :

Dureté : 1800 ± 50 HV.

Résistance à la flexion : 2,2 ± 0,1 GPa .

Ténacité à la rupture : 8 ± 0,5 MPa·m<sup>1/2</sup> .

Résistance à la corrosion : < 0,003 mm/an.

#### Exemples :

Tige d'essai YN8N : poudre de nickel carbonyle, granulométrie < 0,5  $\mu\text{m}$  , durée de vie de l'outil aéronautique 4 heures (Sandvik, 2023).

#### Nuances de carbure cémenté à base de nickel et applications de poudre de nickel

Marque	Teneur en nickel	Type de poudre de nickel	Taille des particules ( $\mu\text{m}$ )	Points clés de la technologie	performance	application
YN6	6%	Méthode du carbonyle	11,5	1400°C fritté, broyé Ra <0,4 $\mu\text{m}$	Dureté 1400 HV, résistance 1,8 GPa , corrosion 0,01 mm/an	Durée de vie de l'outil résistant à la corrosion 2,5 heures
YN10	10%	Méthode du carbonyle	0,81,2	HIP 1380°C, entaille laser femtoseconde	Dureté 1500 HV, KIC 9 MPa·m <sup>1/2</sup> , corrosion < 0,005 mm/an	Moisissure chimique, durée de vie 100 000 fois
YN8	8%	Carbonyle + Sphéroïdisation	0,20,8	Fritté à 1350°C, granulométrie <0,5 $\mu\text{m}$	Dureté 1800 HV, résistance 2,2 GPa , corrosion < 0,003 mm/an	Outil d'aviation, durée de vie 4 heures

### 5. Facteurs clés pour la sélection de la poudre de nickel

La sélection de la poudre de nickel nécessite une prise en compte complète des propriétés de l'alliage, des conditions de traitement et des coûts :

#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

**Haute résistance à la corrosion (comme YN10) :**

Le choix préféré est la poudre de nickel carbonyle, avec une pureté de > 99,95 %, une granulométrie de 0,8 à 1,2 µ m et O < 0,03 %.

Raison : La morphologie régulière et la faible teneur en oxygène garantissent que la phase η est < 0,5 % et que le taux de corrosion est < 0,005 mm/an.

**Alliages à grains ultrafins (tels que YN8N) :**

La méthode carbonyle + sphéroïdisation au plasma a été utilisée, la taille des particules était de 0,2 à 0,8 µ m et la sphéricité était > 0,95.

Motif : Contrôle de la granulométrie fine des grains < 0,5 µ m , dureté augmentée de 510 %.

**Sensible aux coûts (comme YN6) :**

Utiliser la méthode de réduction chimique ou d'électrolyse, taille des particules 12 µ m , O < 0,05 %.

Raison : coût 2030 % inférieur et répond aux exigences générales des outils (résistance 1,8 GPa ) .

**Tige d'essai de grande taille (comme YN15) :**

La méthode d'atomisation a été sélectionnée, avec une granulométrie de 23 µ m et une fluidité d'environ 20 s/50 g.

Raison : Convient aux grosses particules, uniformité de compression > 95 %.

**Sélection de poudre de nickel et scénarios d'application**

Scénario d'application	Poudre de nickel recommandée	Taille des particules ( µ m )	Caractéristiques principales	Améliorations des performances
Haute résistance à la corrosion (YN10)	Méthode du carbonyle	0,81,2	Pureté > 99,95 %, O < 0,03 %	Taux de corrosion < 0,005 mm/an, phase η < 0,5 %
Grain ultra-fin (YN8N)	Carbonyle + Sphéroïdisation	0,20,8	Sphéricité > 0,95, agglomération < 0,5 %	Dureté augmentée de 510 %, granulométrie < 0,5 µ m
Sensible aux coûts (YN 6)	Réduction chimique/électrolyse	12	Pureté > 99,9 %, coût 2030 % inférieur	Résistance 1,8 GPa , répond aux exigences générales
Grande taille (YN15)	Atomisation	vingt-trois	Fluidité ~20 s/50 g	Homogénéité > 95 %, KIC 10 MPa·m <sup>1/2</sup>

**6. Conclusion**

La poudre de nickel utilisée dans le carbure cémenté à base de nickel doit répondre aux exigences suivantes :

**Composition chimique :** pureté > 99,9 %, O < 0,05 %, Fe < 0,01 %, C < 0,01 % (GB/T 53142011).

**Propriétés physiques :** granulométrie 0,52 µ m (conventionnel) ou 0,20,8 µ m (grain ultrafin ) , fluidité <25 s/50 g (GB/T 1482-2010).

**Micromorphologie :** Presque sphérique, sphéricité > 0,9, agglomération < 1 % (GB/T 183762014).

**Mode de préparation :**

**Méthode carbonyle :** haute pureté (> 99,95 %), granulométrie 0,52 µ m , adaptée à YN10 et YN8N.

**Méthode de réduction chimique :** faible coût, taille des particules 0,53 µ m , adaptée à YN6.

**COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT**

**Méthode d'atomisation** : grosses particules (15  $\mu\text{m}$ ), adaptées aux tiges d'essai de grande taille.

**Méthode électrolytique** : faible coût, nécessite un broyage, convient aux nuances générales.

**Exemples d'application** :

YN6 : Poudre de nickel carbonyle (11,5  $\mu\text{m}$ ), dureté 1400 HV, résistance 1,8 GPa.

YN10 : Poudre de nickel carbonyle (0,81,2  $\mu\text{m}$ ), KIC 9  $\text{MPa}\cdot\text{m}^{1/2}$ , résistance à la corrosion < 0,005 mm/an.

YN8N : Poudre de nickel carbonyle + sphéroïdisé (0,20,8  $\mu\text{m}$ ), dureté 1800 HV, granulométrie < 0,5  $\mu\text{m}$ .

Les procédés de fabrication de poudre de nickel (dispersion ultrasonique et protection inerte, par exemple) peuvent améliorer l'uniformité de 20 %, réduire la phase  $\eta$  de 50 % et améliorer la régularité des performances de l'alliage (écart < 3 %). À l'avenir, la nanopoudre de nickel (< 0,2  $\mu\text{m}$ ) et les technologies de préparation à l'état vert (réduction à basse température, par exemple) amélioreront encore les performances du carbure cémenté à base de nickel.

**standard** :

GB/T 5314 2011 : Composition chimique.

GB/T 18376 2014 : Microstructure.

GB/T 1482 2010 : Liquidité.

GB/T 3851 2015 : Résistance à la flexion.

GB/T 7997 2017 : Dureté.

GB/T 4334 2020 : Résistance à la corrosion.



**Annexe :**

### **Poudre de cobalt utilisée dans le carbure cémenté à base de cobalt**

Le carbure cémenté à base de cobalt (CobaltBonded Cemented Carbide) utilise le cobalt (Co)

#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

comme phase de liaison et combine des phases dures telles que le carbure de tungstène (WC). Il est largement utilisé dans les outils de coupe, les moules, les outils miniers et d'autres domaines en raison de son excellente résistance à la flexion (1,5 à 2,5 GPa), de sa ténacité à la rupture (812 MPa·m<sup>1/2</sup>) et de sa dureté (1 400 à 2 200 HV). En tant que matière première essentielle pour le carbure cémenté à base de cobalt, la qualité de la poudre de cobalt influence directement la microstructure, les propriétés mécaniques et les propriétés de mise en œuvre de l'alliage. Ce qui suit détaille les caractéristiques, les exigences, les méthodes de préparation et les applications de la poudre de cobalt utilisée dans le carbure cémenté à base de cobalt, combinées aux normes nationales chinoises (telles que GB/T 5243, GB/T 5314), aux normes internationales (telles que ISO 4499) et aux dernières recherches (telles que Sandvik, 2023 ; ScienceDirect, 2020), le tout en chinois pour garantir que le contenu est précis, détaillé et fascinant.

## 1. Aperçu

Le carbure cémenté à base de cobalt utilise le cobalt comme phase de liaison. Les nuances typiques sont le YG6 (6 % Co, outils de coupe), le YG15 (15 % Co, moules) et le YG8N (8 % Co, outils de coupe à grains ultrafins pour l'aviation). La poudre de cobalt dans cet alliage remplit les fonctions suivantes :

**Phase dure de liaison** : Renforce la liaison des particules de WC et augmente la résistance à la flexion de 20 à 30 %.

**Ténacité améliorée** : La ductilité de la phase cobalt permet au KIC d'atteindre 812 MPa·m<sup>1/2</sup>.

**Activité de frittage** : Le bas point de fusion du cobalt (1495°C) favorise le frittage en phase liquide, réduisant la porosité à <0,01%.

de la poudre de cobalt (pureté, granulométrie, morphologie, teneur en oxygène) affecte directement :

**Microstructure** : granulométrie 0,52 µm (conventionnelle) ou < 0,5 µm ( grain ultrafin), phase η/carbone libre < 1 % (GB/T 183762014).

**Caractéristiques mécaniques** : dureté 1400-2200 HV, écart de résistance à la flexion <5% (GB/T 38512015).

**Stabilité du processus** : uniformité du mélange > 95 %, résistance à l'état vert de l'ébauche > 6 MPa.

Ce qui suit est une explication détaillée de la poudre de cobalt sous quatre aspects : caractéristiques, exigences, méthodes de préparation et applications pratiques.

## 2. Caractéristiques et exigences de la poudre de cobalt

Le carbure cémenté à base de cobalt a des exigences strictes sur la poudre de cobalt, qui doit répondre aux normes de composition chimique, de propriétés physiques et de micromorphologie pour garantir la cohérence des performances de l'alliage.

### 2.1 Composition chimique

**Pureté** :

#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

Exigences : > 99,9 % (fraction massique), teneur totale en impuretés < 0,1 % (GB/T 53142011).

Principales impuretés :

Oxygène (O) : < 0,05 %, une teneur élevée en oxygène entraîne une décarburation (phase  $\eta$ , Co3W3C) et la dureté diminue de 5 à 10 %.

Carbone (C) : < 0,01 %, éviter le carbone libre (> 1 % réduit la résistance de 10 %).

Fer (Fe) : < 0,01 %. Le risque de microfissures causées par des impuretés de Fe augmente de 10 à 15 %.

Soufre (S), phosphore (P) : < 0,005 % chacun, éviter la phase à bas point de fusion (la fragilité augmente de 15 à 20 %).

Nickel (Ni) : < 0,05 %. Une teneur en Ni trop élevée modifiera les propriétés magnétiques et affectera le test magnétique au cobalt (GB/T 3849-2015).

Méthode d'essai :

ICPMS : Détection de métaux tels que Co, Fe, Ni (précision  $\pm 0,001\%$ ).

Analyseur de carbone et de soufre : détecte C et S (précision  $\pm 0,001\%$ ).

Analyseur d'oxygène et d'azote : détection d'O (précision  $\pm 0,01\%$ ).

**Exemples :**

YG8N : Pureté de la poudre de cobalt 99,95 %, O < 0,03 %, Fe < 0,005 % (Sandvik, 2023).

## 2.2 Propriétés physiques

**Granularité :**

Gamme : 0,52  $\mu\text{m}$  (conventionnel), 0,20,8  $\mu\text{m}$  (alliage à grains ultrafins).

Uniformité : écart D50  $\leq \pm 10\%$ , D90/D10 < 3, assurant une uniformité de mélange > 95%.

importance:

La granulométrie fine (< 1  $\mu\text{m}$ ) améliore l'uniformité de la distribution de la phase de liaison et augmente la résistance de 10 à 15 %.

Trop fin (< 0,2  $\mu\text{m}$ ) est facile à agglomérer et l'uniformité est réduite de 5 à 10 %.

Méthode d'essai : Analyseur de taille de particules laser (précision  $\pm 0,01 \mu\text{m}$ , GB/T 19077).

**Surface spécifique :**

Gamme : 13  $\text{m}^2/\text{g}$  (conventionnel), 36  $\text{m}^2/\text{g}$  (nanopoudre).

Importance : La surface spécifique élevée améliore l'activité de frittage et réduit la température de frittage en phase liquide de 20 à 30  $^{\circ}\text{C}$ .

Méthode d'essai : méthode BET (précision  $\pm 0,1 \text{m}^2/\text{g}$ ).

**Liquidité :**

Exigences : < 25 s/50 g (débitmètre à effet Hall, GB/T 1482-2010).

Importance : Une bonne fluidité assure l'uniformité de la billette pressée (> 95 %) et réduit la porosité de 0,01 %.

**Densité apparente :**

Plage : 1,5-2,5  $\text{g}/\text{cm}^3$  (conventionnel), 1,0-2,0  $\text{g}/\text{cm}^3$  (grain ultrafin).

Importance : La densité apparente élevée améliore la résistance à l'état vert de la billette (> 6 MPa).

Méthode d'essai : Méthode de l'entonnoir (précision  $\pm 0,01 \text{g}/\text{cm}^3$ ).

**Exemples :**

### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

YG6 : taille des particules 11,5  $\mu$  m , D50  $\sim$ 1,2  $\mu$  m , fluidité  $\sim$ 20 s/50 g, BET  $\sim$ 2 m<sup>2</sup> / g (ScienceDirect, 2020).

### 2.3 Morphologie microscopique

#### Apparence :

Exigences : Presque sphérique ou polyédrique, sphéricité  $>$  0,9 (observation SEM, 1000 $\times$ ).

Eviter : les bâtonnets, flocons ou particules irrégulières, qui réduisent la fluidité de 10 à 15 %.

#### État de surface :

Lisse, sans fissures, pores ou attaches (inspection MEB, défaut  $<$ 0,1  $\mu$ m ).

Couche d'oxyde de surface :  $<$  10 nm (analyse XPS), éviter la décarburation par frittage.

#### Réunion :

Taux d'agglomération :  $<$  1 %. Un taux trop élevé entraînera une microstructure irrégulière et une augmentation de la porosité de 0,02 %.

Méthode d'essai : SEM (analyse statistique du rapport des particules agglomérées), vérification de la dispersion par ultrasons.

#### Exemples :

YG8N : Poudre de cobalt presque sphérique, taux d'agglomération  $<$  0,5 %, couche d'oxyde de surface  $<$  5 nm (Sandvik, 2023).

### 2.4 Autres exigences

#### Propriétés magnétiques :

La poudre de cobalt est ferromagnétique, avec une magnétisation de saturation d'environ 160 emu/g (Co pur) et un écart de  $\pm$ 5 emu/g.

Méthode d'essai : Magnétomètre à échantillon vibrant (VSM, précision  $\pm$ 0,1 émeu/g).

Importance : Évaluation indirecte des impuretés (Fe augmente la magnétisation, Ni diminue la magnétisation) et du degré d'oxydation.

#### Conditions de stockage :

Humidité :  $<$  40%, Température : 2025°C, Atmosphère inerte ( Ar ou N<sub>2</sub>), Éviter l'oxydation (O augmente de 0,02%).

Emballage sous vide, durée de conservation  $<$  6 mois.

#### Standard :

GB/T 53142011 : Composition chimique (pureté  $>$  99,9 %).

GB/T 183762014 : Microstructure (agglomération  $<$  1 %).

GB/T 1482-2010 : Fluidité ( $<$ 25 s/50 g).

GB/T 3849-2015 : Propriétés magnétiques (évaluation indirecte de la teneur en carbone).

### 2.5 Paramètres clés de la poudre de cobalt

#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

Paramètre	Exigences générales	Exigences relatives aux grains ultrafins	Méthode d'essai	Exemple (yg8n)
Pureté	> 99,9 %	>99,95%	Icpms , analyse du carbone et du soufre	99,95%
Teneur en oxygène	<0,05%	<0,03%	Analyseur d'oxygène et d'azote	<0,03%
Teneur en fer	<0,01%	<0,005%	Icpms	<0,005%
Taille des particules (d50)	0,52 µm	0,20,8 µm	Analyse granulométrique au laser	~0,5 µm
Surface spécifique	13 m <sup>2</sup> / g	36 m <sup>2</sup> / g	Pari	~4 m <sup>2</sup> / g
Liquidité	<25 s/50 g	<20 s/50 g	débitmètre à effet Hall	~15 s/50 g
Morphologie	Presque sphérique, sphéricité> 0,9	Presque sphérique, sphéricité> 0,95	Sem	Sphéricité> 0,95
Taux de retrouvailles	<1%	<0,5%	Sem, dispersion ultrasonique	<0,3%
Magnétisation	~160 émeu/g, écart <±5 émeu/g	~160 émeu/g, écart <±3 émeu/g	Vsm	~158 émeu/g

GB/T 53142011 (composition chimique), GB/T 183762014 (microstructure), GB/T 14822010 (fluidité)

### 3. Méthode de préparation de la poudre de cobalt

La fabrication de la poudre de cobalt doit garantir une pureté élevée, une granulométrie fine et une morphologie uniforme pour répondre aux exigences du carbure cémenté. Les méthodes courantes incluent :

#### 3.1 Réduction chimique (réduction hydrométallurgique)

##### Principe :

La solution de sel de cobalt (comme CoSO<sub>4</sub>, CoCl<sub>2</sub>) est réduite en poudre de cobalt par un agent réducteur (tel que H<sub>2</sub>, NaBH<sub>4</sub>).

Réaction :  $\text{Co}^{2+} + \text{H}_2 \rightarrow \text{Co} + 2\text{H}^+$  ( H<sub>2</sub> haute pression, 150200°C).

##### Processus :

Matières premières : CoSO<sub>4</sub> (>99,9%), agent réducteur (pureté H<sub>2</sub> >99,99%).

Équipement : Réacteur haute pression (510 MPa), système de filtration/séchage.

Paramètres : pH 8-10, température 150200°C, pression H<sub>2</sub> 25 MPa.

Post-traitement : lavage (eau déionisée), séchage sous vide (80°C, <10<sup>-2</sup> Pa ).

Classification : classification par flux d'air, granulométrie contrôlée 0,52 µ m .

##### Caractéristiques :

Pureté : > 99,9 %, O < 0,05 %, Fe < 0,01 %.

Morphologie : polyèdre ou presque sphérique, sphéricité 0,80,9.

Taille des particules : 0,53 µ m , écart D50 <±10 %.

##### Avantages :

#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

Coût inférieur (1520 % inférieur au procédé carbonyle).

Convient à la production de masse, avec une granulométrie réglable.

**insuffisant :**

La morphologie est légèrement irrégulière et le taux d'agglomération est de 12%.

La teneur en oxygène est légèrement élevée (0,05 à 0,1 %) et doit être strictement contrôlée.

**application :**

Barre d'essai YG6 : poudre de cobalt réduite, granulométrie 1,5  $\mu\text{m}$ , résistance à la flexion 2,0 GPa (ScienceDirect, 2020).

### 3.2 Procédé carbonyle

**Principe :**

Le cobalt réagit avec le monoxyde de carbone (CO) pour former du cobalt carbonyle  $[\text{Co}_2(\text{CO})_8]$ , qui se décompose en poudre de cobalt de haute pureté et en CO lors du chauffage.

Réaction :  $2\text{Co} + 8\text{CO} \rightarrow \text{Co}_2(\text{CO})_8$  (gazeux, 100150°C),  $\text{Co}_2(\text{CO})_8 \rightarrow 2\text{Co} + 8\text{CO}$  (décomposition, 250300°C).

**Processus :**

Matières premières : cobalt de haute pureté (> 99,9%), gaz CO (pureté > 99,99%).

Equipement : réacteur carbonyle (pression 0,51 MPa), four de décomposition (sous vide ou atmosphère inerte).

Paramètres : température de décomposition 250350°C, débit d'air 0,51 L/min.

Classification : Classification par criblage ou par flux d'air, granulométrie contrôlée 0,52  $\mu\text{m}$ .

**Caractéristiques :**

Pureté : > 99,95 %, O < 0,03 %, C < 0,01 %.

Morphologie : Presque sphérique, sphéricité > 0,95, taux d'agglomération < 0,5 %.

Taille des particules : 0,52  $\mu\text{m}$ , écart D50  $\leq \pm 5\%$ .

**Avantages :**

Haute pureté, impuretés (Fe, S) < 0,005 %.

La morphologie est régulière et la fluidité est bonne (~18 s/50 g).

**Insuffisant :**

L'équipement est complexe, le CO est hautement toxique et le coût est 20 à 30 % plus élevé.

**Application :**

Barre d'essai YG8N : poudre de cobalt carbonyle, granulométrie ~ 0,8  $\mu\text{m}$ , dureté 2000 HV (Sandvik, 2023).

### 3.3 Atomisation

**Principe :**

Le cobalt fondu (> 99,9 %) est atomisé en fines particules par un gaz à haute pression (N<sub>2</sub>, Ar) ou de l'eau.

**Processus :**

Matière première : lingot de cobalt de haute pureté (> 99,9 %).

**COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT**

Equipement : four à induction sous vide (15001550°C), tour d'atomisation (pression de gaz 510 MPa).

Paramètres : ouverture de la buse 0,51 mm, vitesse de refroidissement  $10^3 10^4$  °C/s.

Classification : classification du flux d'air, granulométrie 15  $\mu$  m .

**Caractéristiques :**

Pureté : > 99,9 %, O < 0,08 %, C < 0,02 %.

Morphologie : sphérique, sphéricité > 0,9.

Taille des particules : 15  $\mu$  m , écart D50  $\leq \pm 15\%$ .

**Avantages :**

Morphologie régulière et excellente fluidité (~20 s/50 g).

Convient aux grosses particules de poudre de cobalt (> 2  $\mu$  m ) .

**Insuffisant :**

La taille des particules est trop grande (> 1  $\mu$  m ) , ce qui ne convient pas aux alliages à grains ultrafins.

La teneur en oxygène est élevée (0,05 à 0,1 %).

**Application :**

Tige d'essai YG15 : poudre de cobalt atomisée, granulométrie 23  $\mu$  m , KIC 12 MPa·m<sup>1/2</sup> .

### 3.4 Électrodéposition

**Principe :**

La poudre de cobalt est produite par dépôt électrolytique d'une solution de sel de cobalt (comme CoSO<sub>4</sub>).

Réaction :  $\text{Co}^{2+} + 2\text{e}^- \rightarrow \text{Co}$  (cathode, densité de courant 100500 A/ m<sup>2</sup> ) .

**Processus :**

Matières premières : CoSO<sub>4</sub> (>99,9%), électrolyte (pH 35).

Equipement : cellule électrolytique (cathode en acier inoxydable), alimentation à courant constant.

Paramètres : température 5060°C, densité de courant 200400 A/m<sup>2</sup> , temps 24 heures.

Post-traitement : lavage, séchage (80°C, <10<sup>-2</sup> Pa ) , broyage (<2  $\mu$  m ) .

**Caractéristiques :**

Pureté : > 99,9 %, O < 0,1 %, Fe < 0,02 %.

Morphologie : dendritique ou irrégulière, nécessite un broyage.

Taille des particules : 110  $\mu$ m (0,52  $\mu$ m après broyage) .

**Avantages :**

Faible coût (30 % inférieur au procédé carbonyle).

Convient à la production à grande échelle.

**insuffisant :**

La morphologie est irrégulière et le broyage augmente l'agglomération (23%).

La teneur en oxygène est élevée (0,10,2%) et doit être optimisée.

**application :**

Barre d'essai YG6 : poudre de cobalt électrolytique, granulométrie 12  $\mu$  m , dureté 1500 HV.

#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

### 3.5 Mesures d'optimisation

#### Réduire les niveaux d'oxygène :

sous atmosphère inerte ( Ar , O<sub>2</sub> <0,005%), oxygène réduit à <0,03%.

vide (<10<sup>-2</sup> Pa) pour éviter l'oxydation.

#### Granularité du contrôle :

La dispersion ultrasonique (500 W, 10 min) a réduit le taux d'agglomération à < 0,5 %.

Classification du flux d'air (précision ±0,1 μ m ) , écart D50 <±5%.

#### Améliorer l'apparence :

Méthode carbonyle + sphéroïdisation plasma, la sphéricité a augmenté à > 0,95.

Méthode de réduction chimique plus modification de surface (acide stéarique 0,1%), fluidité augmentée de 10%.

#### Exemples :

YG8N : Poudre de cobalt carbonyle + dispersion ultrasonique, granulométrie 0,5 μ m , agglomération < 0,3 % (Sandvik, 2023).

**Tableau comparatif des méthodes de préparation de la poudre de cobalt**

Méthode	Pureté	Taille des particules ( μ m )	Morphologie	Teneur en oxygène	Fluidité (s/50 g)	coût	Grades applicables
Méthode de réduction chimique	> 99,9 %	0,53	Polyèdre, 0,80,9	<0,05%	~22	milieu	YG6, YG15
Méthode du carbonyle	>99,95%	0,52	Presque sphérique, > 0,95	<0,03%	~18	haut	Y8N
Atomisation	> 99,9 %	15	Sphérique, >0,9	<0,08%	~20	milieu	YG15 (grande taille)
Électrolyse	> 99,9 %	0,52 (broyage)	Irrégulier, 0,70,8	<0,1%	~25	Faible	YG6 (faible coût)

#### Mesures d'optimisation :

**Réduire la teneur en oxygène :** Protection Ar (O<sub>2</sub> < 0,005 %), séchage sous vide (< 10<sup>-2</sup> Pa).

**Contrôle granulométrique :** dispersion ultrasonique (500 W, 10 min), taux d'agglomération < 0,5%.

**Optimisation de la morphologie :** méthode carbonyle + sphéroïdisation plasma, sphéricité>0,95.

## 4. Application de la poudre de cobalt dans le carbure cémenté à base de cobalt

Le choix et l'optimisation de la poudre de cobalt influencent directement la préparation et les performances des barres d'essai en carbure cémenté à base de cobalt. Voici une description des nuances et procédés spécifiques.

### 4.1 YG6 (6 % Co, outil à usage général)

#### Besoins en poudre de cobalt :

Pureté : > 99,95 %, O < 0,03 %, Fe < 0,005 %.

Taille des particules : 11,5 μ m , D50 ~1,2 μ m , sphéricité > 0,9.

#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

Préparation : Méthode carbonyle ou méthode de réduction chimique, fluidité ~20 s/50 g.

**Processus de préparation :**

**Ingrédients :** WC (94 % en poids), 12  $\mu\text{m}$ , Co (6 % en poids), Cr<sub>3</sub>C<sub>2</sub> (0,3 % en poids).

**Composition :** broyage humide (12-14 h, PEG 1,5%), D50 80-150  $\mu\text{m}$ .

**Pressage :** CIP (200250 MPa), billeterie 6,2×6,2×43 mm.

**Frittage :** frittage sous vide (1400°C, <10<sup>-3</sup> Pa) + HIP (1400°C, 100 MPa).

**Usinage :** rectification (Ra <0,4  $\mu\text{m}$ ), entaille par étincelage (0,25 ± 0,02 mm).

**performance :**

Dureté : 1500 ± 50 HV (GB/T 79972017).

Résistance à la flexion : 2,0 ± 0,1 GPa (GB/T 38512015).

Ténacité à la rupture : 8 ± 0,5 MPa·m<sup>1/2</sup>.

**Exemples :**

Barre d'essai YG6 : poudre de cobalt carbonyle, granulométrie ~1,2  $\mu\text{m}$ , durée de vie de coupe 2 heures (Sandvik, 2023).

#### 4.2 YG15 (15 % Co, moule à haute ténacité)

**Besoins en poudre de cobalt :**

Pureté : > 99,9 %, O < 0,05 %, Fe < 0,01 %.

Taille des particules : 1,52  $\mu\text{m}$ , D50 ~1,8  $\mu\text{m}$ , agglomération <1 %.

Préparation : Réduction chimique ou atomisation, coulabilité ~22 s/50 g.

**Processus de préparation :**

**Ingrédients :** WC (85 % en poids), 1,5 à 2,5  $\mu\text{m}$ , Co (15 % en poids), Cr<sub>3</sub>C<sub>2</sub> (0,5 % en poids).

**Compoundage :** broyage humide (14-16 h, PVA 1%), D50 100-200  $\mu\text{m}$ .

**Pressage :** CIP (250300 MPa), billeterie 5,0×10,0×40 mm.

**Frittage :** frittage sous vide (1450°C, <10<sup>-3</sup> Pa) + HIP (1450°C, 120 MPa).

**Usinage :** rectification (Ra <0,2  $\mu\text{m}$ ), entaille par étincelage (0,25 ± 0,01 mm).

**performance :**

Dureté : 1400 ± 50 HV.

Résistance à la flexion : 2,5 ± 0,1 GPa.

Ténacité à la rupture : 12 ± 0,5 MPa·m<sup>1/2</sup>.

**Exemples :**

Tige d'essai YG15 : poudre de cobalt réduite, granulométrie ~1,8  $\mu\text{m}$ , durée de vie de perforation 120 000 fois (ScienceDirect, 2020).

#### 4.3 YG8N (8% Co, outil d'aviation à grain ultra-fin)

**Besoins en poudre de cobalt :**

Pureté : > 99,95 %, O < 0,02 %, Fe < 0,005 %.

Taille des particules : 0,20,8  $\mu\text{m}$ , D50 ~0,5  $\mu\text{m}$ , sphéricité > 0,95.

Préparation : Méthode Carbonyle + sphéroïdisation plasma, fluidité ~15 s/50 g.

**Processus de préparation :**

**COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT**

**Ingrédients** : WC (91,5 % en poids) , 0,20,4  $\mu\text{m}$  , Co (8 % en poids), Cr3C2 (0,4 % en poids), VC (0,1 % en poids).

**Mélange** : broyage à billes haute énergie (1820 h, PEG modifié 1%), D50 30100  $\mu\text{m}$  .

**Pressage** : CIP (300350 MPa), bille 6,3×6,3×44 mm.

**Frittage** : frittage sous vide (1350°C,  $<5 \times 10^{-4}$  Pa) + HIP (1350°C, 150 MPa).

**Usinage** : rectification ultra-précise ( $R_a < 0,2 \mu\text{m}$ ) , entaille laser femtoseconde ( $0,25 \pm 0,005 \text{ mm}$ ).

**performance** :

Dureté : 2000  $\pm$  50 HV.

Résistance à la flexion : 2,2  $\pm$  0,1 GPa .

Ténacité à la rupture : 9  $\pm$  0,5 MPa·m<sup>1/2</sup> .

**Exemples** :

Tige d'essai YG8N : poudre de cobalt carbonyle, granulométrie  $< 0,5 \mu\text{m}$  , durée de vie de l'outil aéronautique 4 heures (Sandvik, 2023).

## 5. Facteurs clés pour la sélection de la poudre de cobalt

La sélection de la poudre de cobalt nécessite une prise en compte complète des propriétés de l'alliage, des conditions de traitement et des coûts :

**Alliages hautes performances** (tels que YG8N) :

Le choix préféré est la poudre de cobalt carbonyle, avec une pureté de  $> 99,95 \%$  , une granulométrie de 0,2 à 0,8  $\mu\text{m}$  et O  $< 0,02 \%$  .

Raison : La granulométrie fine et la faible teneur en oxygène garantissent une granulométrie  $< 0,5 \mu\text{m}$  , la dureté est augmentée de 5 à 10 %.

**Alliage à haute ténacité** (tel que YG15) :

Utiliser une méthode de réduction chimique ou d'atomisation, taille des particules 1,52  $\mu\text{m}$  , O  $< 0,05 \%$  .

Raison : Une taille de particule légèrement plus grande convient à une teneur élevée en cobalt, KIC augmenté de 10 %.

**Sensible aux coûts** (comme YG6) :

Utiliser une réduction chimique ou une électrolyse, taille des particules 12  $\mu\text{m}$  , O  $< 0,05 \%$  .

Raison : coût inférieur de 20 à 30 % , répond aux exigences générales des outils (résistance 2,0 GPa) .

**Tige d'essai de grande taille** (comme YG15) :

La méthode d'atomisation a été utilisée, taille des particules 23  $\mu\text{m}$  , fluidité  $\sim 20 \text{ s}/50 \text{ g}$  .

Raison : Convient aux grosses particules, uniformité de compression  $> 95 \%$  .

## 6. Conclusion

Le carbure cémenté utilisé à base de cobalt doit répondre aux exigences suivantes :

**Composition chimique** : pureté  $> 99,9 \%$  , O  $< 0,05 \%$  , Fe  $< 0,01 \%$  , C  $< 0,01 \%$  (GB/T 53142011).

**Propriétés physiques** : granulométrie 0,52  $\mu\text{m}$  (conventionnel) ou 0,20,8  $\mu\text{m}$  (grain ultrafin) , fluidité  $< 25 \text{ s}/50 \text{ g}$  (GB/T 1482-2010).

**Micromorphologie** : Presque sphérique, sphéricité  $> 0,9$  , agglomération  $< 1 \%$  (GB/T 183762014).

### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

**Mode de préparation :**

**Méthode carbonyle :** haute pureté (> 99,95 %), granulométrie 0,52 μ m , adaptée à YG8N.

**Méthode de réduction chimique :** faible coût, taille des particules 0,53 μ m , adaptée à YG6 et YG15.

**Méthode d'atomisation :** grosses particules (15 μ m ) , adaptées aux tiges d'essai de grande taille.

**Méthode électrolytique :** faible coût, nécessite un broyage, convient aux nuances générales.

**Exemples d'application :**

YG6 : Poudre de carbonyle ou de cobalt réduit (11,5 μ m ) , dureté 1500 HV, résistance 2,0 GPa .

YG15 : poudre de cobalt réduite ou atomisée (1,52 μ m ) , KIC 12 MPa·m<sup>1/2</sup> .

YG8N : Carbonyle + poudre de cobalt sphéroïdisée (0,20,8 μ m ) , dureté 2000 HV, granulométrie < 0,5 μ m .

Les procédés de fabrication de poudre de cobalt (dispersion ultrasonique, protection inerte, etc.) peuvent améliorer l'uniformité de 20 %, réduire la phase η de 50 % et améliorer la cohérence des performances de l'alliage (écart < 3 %). À l'avenir, la poudre de cobalt nanométrique (< 0,2 μ m ) et les technologies de préparation à l'état vert (réduction à basse température, par exemple) amélioreront encore les performances du carbure cémenté à base de cobalt.

**standard :**

GB/T 5314 2011 : Composition chimique. GB/T 18376 2014 : Microstructure.

GB/T 1482 2010 : Liquidité. GB/T 3851 2015 : Résistance à la flexion.

GB/T 7997 2017 : Dureté. GB/T 3849 2015 : Propriétés magnétiques.

**Tableau comparatif de la poudre de cobalt et de la poudre de nickel**

Caractéristiques	Poudre de cobalt	Poudre de nickel
Pureté	>99,9 %, >99,95 % (grain ultra-fin)	>99,9%, >99,95% (haute résistance à la corrosion )
Granularité	0,52 μ m , 0,20,8 μ m (grain ultrafin )	0,52 μ m , 0,20,8 μ m (grain ultrafin )
Teneur en oxygène	<0,05 %, <0,03 % (grain ultrafin)	<0,05%, <0,03% (haute résistance à la corrosion )
Morphologie	Presque sphérique, sphéricité> 0,9	Presque sphérique, sphéricité> 0,9
Magnétisation	~160 émeu/g	~55 émeu/g
Principale méthode de préparation	Carbonylation, réduction chimique, atomisation, électrolyse	Carbonylation, réduction chimique, atomisation, électrolyse
Coût	Plus élevé (20 % de plus que la poudre de nickel)	Inférieur
Propriétés de l'alliage	Résistance 1,52,5 GPa , KIC 812 MPa·m <sup>1/2</sup>	Résistance 1,82,2 GPa , KIC 710 MPa·m <sup>1/2</sup>
Résistance à la corrosion	0,01 mm/an (5 % HCl)	< 0,005 mm/an (5 % HCl)
Scénario d'application	Outils de coupe, matrices, outils miniers	Équipements chimiques, outils pétroliers, moules à haute température

Norme : GB/T 43342020 (résistance à la corrosion), GB/T 38512015 (résistance à la flexion).

**COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT**

## CTIA GROUP LTD

### 30 Years of Cemented Carbide Customization Experts

#### Core Advantages

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

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

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

#### Serving Customers

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

#### Service Commitment

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

#### Contact Us

**Email :** [sales@chinatungsten.com](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)



**Annexe :**

### **GB/T 7997-2017 Méthode d'essai pour la dureté Vickers et la microdureté du carbure cimenté**

La norme GB/T 7997-2017 « Méthodes d'essai pour la dureté Vickers et la microdureté du carbure cimenté » est une norme nationale chinoise qui spécifie les méthodes d'essai pour la dureté Vickers (HV) et la microdureté (dureté micro Vickers, HVM) du carbure cimenté. Elle s'applique aux essais de dureté des matériaux en carbure cimenté (tels que WC-Co, WC-Ni, etc.).

#### **1 Portée**

Cette norme spécifie les méthodes d'essai pour la dureté Vickers et la microdureté du carbure cimenté, y compris les principes d'essai, l'équipement, les exigences relatives aux échantillons, les procédures d'essai, le calcul des résultats, le rapport d'essai, etc.

Cette norme s'applique à la détermination de la dureté des produits en carbure cimenté fritté (tels que les outils de coupe, les outils miniers, les pièces résistantes à l'usure) et des ébauches en carbure cimenté non fritté, et s'applique à la plage de dureté de HV 500 à HV 3000.

#### **2 Références normatives**

Les documents suivants constituent des documents de référence essentiels à la mise en œuvre de la présente norme. Pour les documents de référence datés, seule la version en vigueur est applicable ; pour les documents de référence non datés, la dernière version (y compris tous les amendements) est applicable.

GB/T 230.1 Essai de dureté Rockwell pour matériaux métalliques Partie 1 : Méthode d'essai (échelles A, B, C, D, E, F, G, H, K, N, T)

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

GB/T 4340.1 Essai de dureté Vickers pour matériaux métalliques Partie 1 : Méthode d'essai  
GB/T 4340.2 Essai de dureté Vickers pour matériaux métalliques Partie 2 : Vérification et étalonnage des duromètres  
GB/T 4340.3 Essai de dureté Vickers pour matériaux métalliques Partie 3 : Étalonnage des blocs de dureté étalon  
GB/T 4505 Méthodes d'échantillonnage et de préparation d'échantillons pour le carbure cémenté  
GB/T 5124 Méthodes d'analyse chimique du carbure cémenté  
GB/T 16594 Règles générales pour l'inspection de la microstructure des matériaux métalliques

### 3 Termes et définitions

Dureté Vickers (HV) : À l'aide d'un duromètre Vickers, un pénétrateur diamant tétraédrique standard est enfoncé dans la surface de l'échantillon sous une charge spécifiée, et la valeur de dureté est calculée après avoir mesuré la diagonale de l'empreinte. L'unité est HV.

Microdureté (HVM) : Dureté Vickers mesurée au microscope, adaptée aux essais de dureté d'échantillons de petite taille ou de micro-zones locales, avec une charge généralement inférieure à 1 kgf.

Diagonale d'indentation : Longueur des deux diagonales de l'indentation Vickers, en mm.

Valeur de dureté : Dureté calculée en fonction de la longueur diagonale de l'empreinte et de la charge, en kgf/mm<sup>2</sup> (convertie en HV).

### 4 Principe du test

Les essais de dureté et de microdureté Vickers utilisent un pénétrateur diamanté pyramidal quadrangulaire standard (angle au sommet : 136° ± 0,5°) qui s'enfonce dans la surface de l'échantillon sous une charge spécifiée, le maintient pendant un certain temps, puis le relâche, mesure la diagonale de l'empreinte et calcule la dureté selon la formule suivante :

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

dans:

- HV : 维氏硬度值 (kgf/mm<sup>2</sup>, 换算为 HV) ;
- F : 试验载荷 (kgf) ;
- d : 压痕对角线的平均长度 (mm) .

### 5 Équipement et matériel

Testeur de dureté :

Duromètre Vickers : conforme à la norme GB/T 4340.2, plage de charge 1-50 kgf±0,1 kgf.

Testeur de microdureté : plage de charge 0,01-1 kgf±0,001 kgf, équipé d'un microscope (grossissement ≥400 fois).

Pénétrateur : Pénétrateur diamant tétraédrique régulier, angle au sommet 136°±0,5°, sans défaut de surface.

Bloc de dureté standard : conforme à la norme GB/T 4340.3, plage de dureté HV 500 à HV 3000.

Traitement de surface de l'échantillon : Poli jusqu'à une rugosité de surface Ra ≤ 0,2 μm±0,02 μm, sans couche d'oxyde ni fissures.

#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

Conditions environnementales : température 20-25°C±1°C, humidité 40%-60%±5% HR, aucune interférence de vibration.

## 6. Échantillons

Exemples d'exigences :

L'échantillonnage doit être effectué conformément à la norme GB/T 4505, avec une surface plane et une épaisseur  $\geq 1,5$  fois la profondeur d'indentation (environ 0,1-0,5 mm).

Taille de l'échantillon : surface minimale 5 mm  $\times$  5 mm  $\pm$  0,1 mm, taille maximale 50 mm  $\times$  50 mm  $\pm$  0,1 mm.

Traitement de surface :

Polissage : Utiliser du papier de verre métallographique (granulométrie 800-2000 mesh) et de la pâte à polir (granulométrie  $\leq 1 \mu\text{m} \pm 0,01 \mu\text{m}$ ).

Nettoyage : Utiliser de l'éthanol (pureté  $\geq 99,5 \% \pm 0,1 \%$ ) pour éliminer les taches d'huile.

Nombre d'échantillons : 3 à 5 échantillons par lot, avec au moins 5 empreintes sur le même échantillon.

## 7 étapes de test

### 7.1 Essai de dureté Vickers

Étalonnage de l'équipement :

Le testeur de dureté est étalonné à l'aide d'un bloc de dureté standard avec un écart de  $< \pm 2\% \pm 0,5\%$ .

Calibrez la géométrie du pénétrateur avec un écart d'angle supérieur de  $< \pm 0,5^\circ$ .

Sélection de charge :

Charges courantes : 5 kgf , 10 kgf , 30 kgf  $\pm 0,1$  kgf (sélectionner en fonction de la plage de dureté).

Temps de maintien de la charge : 10-15 s  $\pm 1$  s.

Mesure d'indentation :

Placez l'échantillon sur le banc d'essai du duromètre et assurez-vous que la surface de l'échantillon est de niveau.

Appliquez la charge, maintenez-la pendant une durée déterminée, puis déchargez-la.

Mesurer les longueurs des deux diagonales de l'empreinte ( $d_1$  et  $d_2$ ) avec une précision de 0,001 mm  $\pm$  0,0001 mm.

Espacement des indentations :  $\geq 3$  fois la longueur diagonale (environ 0,3-1,5 mm).

Calcul de la dureté :

Calculez la valeur HV selon la formule et prenez la valeur moyenne de 5 indentations.

Écart  $< \pm 3 \% \pm 0,5 \%$ , sinon retester.

### 7.2 Essai de microdureté

Étalonnage de l'équipement :

Utiliser un testeur de microdureté, une charge calibrée et un grossissement de microscope ( $\geq 400$  x).

Écart  $< \pm 2\% \pm 0,5\%$ .

Sélection de charge :

Charges courantes : 0,05 kgf , 0,1 kgf , 0,5 kgf  $\pm 0,001$  kgf .

Temps de maintien de la charge : 10-15 s  $\pm 1$  s.

#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

Mesure d'indentation :

Observez l'indentation au microscope et mesurez les longueurs diagonales ( $d_1$  et  $d_2$ ) avec une précision de  $0,0005 \text{ mm} \pm 0,0001 \text{ mm}$ .

Espacement des indentations :  $\geq 5$  fois la longueur diagonale (environ  $0,05-0,2 \text{ mm}$ ).

Calcul de la dureté :

Calculez la valeur HVM selon la formule et prenez la valeur moyenne de 5 indentations.

Écart  $< \pm 4\% \pm 0,5\%$ , sinon retester.

## 8 Expression des résultats

Valeur de dureté : exprimée en HV ou HVM, conserver l'entier, tel que HV 1800 ou HVM 2000.

Contenu du rapport :

Numéro d'échantillon, valeur de charge, longueur diagonale de l'empreinte, valeur de dureté moyenne et écart.

Conditions environnementales (température, humidité).

Date du test et opérateur.

Exemple : échantillon WC-10%Co, charge 30 kgf, diagonale moyenne  $0,042 \text{ mm} \pm 0,001 \text{ mm}$ , HV  $1800 \pm 50$ .

## 9 facteurs d'influence

Surface de l'échantillon : Une rugosité de surface  $R_a > 0,2 \mu\text{m} \pm 0,02 \mu\text{m}$  entraîne une indentation floue et une faible dureté (écart  $> 5\% \pm 1\%$ ).

Écart de charge : Un écart de charge  $> \pm 0,1 \text{ kgf}$  affecte la profondeur d'indentation, un écart de dureté  $> 3\% \pm 0,5\%$ .

Vibrations environnementales : une fréquence de vibration  $> 1 \text{ Hz} \pm 0,1 \text{ Hz}$  entraînera une déviation d'indentation et une prévention des vibrations est nécessaire.

État du pénétrateur : Les défauts du pénétrateur (rayures  $> 0,01 \text{ mm} \pm 0,001 \text{ mm}$ ) entraînent une faible dureté et nécessitent une inspection régulière.

## 10 règles d'inspection

Échantillonnage : Conformément à la norme GB/T 4505, 3 à 5 échantillons sont prélevés sur chaque lot ( $\leq 100 \text{ kg}$ ) et 5 empreintes sont mesurées pour chaque échantillon.

Fréquence d'inspection : inspection en usine (chaque lot), inspection de type (une fois par an ou lorsque le processus change).

Jugement : Tous les échantillons sont qualifiés si leurs valeurs de dureté répondent aux exigences ; si l'un d'eux échoue, une nouvelle inspection est autorisée, et si la nouvelle inspection échoue toujours, le lot n'est pas qualifié.

## 11 Rapport de test

Le rapport de test doit inclure :

Description de l'échantillon (composition, procédé de préparation).

Méthode d'essai (Vickers ou microdureté).

Valeur de charge, longueur diagonale de l'indentation, valeur de dureté et écart.

Conditions environnementales (température  $20-25^\circ\text{C} \pm 1^\circ\text{C}$ , humidité  $40\%-60\% \pm 5\% \text{ HR}$ ).

### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

Numéro standard (GB/T 7997-2017).

Date du test et signature de l'opérateur.

#### **Annexe A (Annexe informative) Valeurs de dureté typiques du carbure cémenté**

WC-6%Co : HV 1800-2000±50, adapté aux outils de coupe.

WC-10%Co : HV 1500-1700±50, adapté aux outils miniers.

WC-12%Ni : HV 1400-1600±50, adapté aux pièces résistantes à l'usure.

#### **Annexe B (Annexe normative) Notes supplémentaires sur les méthodes d'essai**

Mesure d'indentation : lors de la mesure de la microdureté, le grossissement du microscope doit être  $\geq 400$  fois et le champ de vision doit être clair.

Contrôle environnemental : L'environnement de test ne présente aucune perturbation du flux d'air et la fluctuation de température est  $< \pm 1^\circ\text{C}$ .

Entretien du pénétrateur : Inspectez le pénétrateur tous les 500 tests et remplacez-le si la rayure est  $> 0,01 \text{ mm} \pm 0,001 \text{ mm}$ .

#### **Résumer**

La norme GB/T 7997-2017 spécifie la méthode d'essai pour la dureté Vickers et la microdureté du carbure cémenté. Elle utilise un pénétrateur diamant tétraédrique standard (angle au sommet  $136^\circ \pm 0,5^\circ$ ) pour calculer la dureté (HV 500-3000) en mesurant la longueur diagonale de l'empreinte. La norme spécifie l'étalonnage de l'équipement (écart  $< \pm 2\%$ ), la préparation des échantillons ( $R_a \leq 0,2 \mu\text{m}$ ), les étapes d'essai et l'expression des résultats afin de garantir la précision des essais de dureté (écart  $< \pm 3\%$ ). Cette méthode est adaptée au contrôle qualité des produits en carbure cémenté tels que les outils aéronautiques (HV 1800-2000) et les outils miniers (HV 1500-1700).

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

Annexe :

## GB/T 4340.1-2017 Essai de dureté Vickers pour les matériaux métalliques Partie 1 : Méthodes d'essai

### 1 Portée

La présente partie spécifie la méthode d'essai de dureté Vickers des matériaux métalliques, incluant le principe d'essai, l'équipement d'essai, les exigences relatives aux éprouvettes, la procédure d'essai, le calcul de la dureté, l'expression des résultats et le contenu du rapport d'essai.

Cette norme s'applique à la détermination de la dureté Vickers des matériaux métalliques et de certains matériaux non métalliques (tels que le carbure cémenté et les céramiques), dont la dureté varie de HV 5 à HV 3000 et la charge admissible varie de 0,01 kgf à 50 kgf .

Cette norme ne s'applique pas aux échantillons présentant une rugosité de surface excessivement élevée ( $R_a > 0,4 \mu\text{m} \pm 0,02 \mu\text{m}$  ) ou une épaisseur insuffisante pour résister à la profondeur d'indentation.

### 2 Références normatives

Les documents suivants constituent des documents de référence essentiels pour la mise en œuvre de cette norme. Seules les versions spécifiées des documents référencés sont applicables.

GB/T 230.1 Essai de dureté Rockwell pour matériaux métalliques Partie 1 : Méthode d'essai (échelles A, B, C, D, E, F, G, H, K, N, T)

GB/T 4340.2 Essai de dureté Vickers pour matériaux métalliques Partie 2 : Vérification et étalonnage des duromètres

GB/T 4340.3 Essai de dureté Vickers pour matériaux métalliques Partie 3 : Étalonnage des blocs de dureté étalon

GB/T 4505 Méthodes d'échantillonnage et de préparation d'échantillons pour le carbure cémenté

GB/T 16594 Règles générales pour l'inspection de la microstructure des matériaux métalliques

GB/T 8170 Règles d'arrondi des valeurs

### 3 Termes et définitions

Dureté Vickers (HV) : Sous une charge spécifiée, un pénétrateur diamanté pyramidal quadrangulaire régulier avec un angle au sommet de  $136^\circ$  est enfoncé dans la surface de l'échantillon, et la valeur de dureté est calculée après avoir mesuré la diagonale de l'empreinte. L'unité est HV.

Dureté micro Vickers (HVM) : Dureté Vickers mesurée au microscope lorsque la charge est inférieure à 1 kgf .

Diagonale d'indentation : Longueur des deux diagonales de l'indentation Vickers, en mm.

Charge d'essai : La force appliquée au pénétrateur, en kgf ou N ( $1 \text{ kgf} = 9,80665 \text{ N}$ ).

Temps de maintien : Temps pendant lequel la charge est maintenue après son application, en secondes.

### 4 Principe du test

L'essai de dureté Vickers utilise un pénétrateur diamanté pyramidal quadrangulaire régulier avec un angle au sommet de  $136^\circ \pm 0,5^\circ$ . Il est enfoncé dans la surface de l'échantillon sous une charge spécifiée, maintenu pendant un certain temps , puis déchargé. Les longueurs des deux diagonales de

#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

l'empreinte ( $d_1$  et  $d_2$ ) sont mesurées et la valeur moyenne  $d$  est calculée. La dureté est calculée en la substituant dans la formule :

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

其中:

- $HV$ : 维氏硬度值 (kgf/mm<sup>2</sup>, 换算为 HV) ;
- $F$ : 试验载荷 (kgf) ;
- $d$ : 压痕对角线的算术平均值 (mm) ,  $d = \frac{d_1 + d_2}{2}$ .

若以 N 为单位, 则公式为:

$$HV = 0.1891 \cdot \frac{F}{d^2}$$

其中  $F$  单位为 N.

## 5 Équipements de test

Testeur de dureté Vickers :

Plage de charge : 0,01 kgf à 50 kgf  $\pm$  0,1 kgf .

Précision de charge : conformément à GB/T 4340.2, écart  $< \pm 1\% \pm 0,1\%$ .

Système de mesure : microscope ou système optique intégré, précision 0,001 mm  $\pm$  0,0001 mm.

Hauteur de pression :

Pénétrant diamant tétraédrique régulier, angle au sommet  $136^\circ \pm 0,5^\circ$ , rectitude des bords  $< 0,002$  mm  $\pm$  0,0002 mm.

Il n'y a aucune rayure ni défaut sur la surface (rayures  $< 0,01$  mm  $\pm$  0,001 mm).

Bloc de dureté standard :

Conforme à la norme GB/T 4340.3, plage de dureté HV 100 à HV 3000.

Conditions environnementales :

Température : 20-25°C  $\pm$  1°C.

Humidité : 40%-60%  $\pm$  5% HR.

Aucune perturbation vibratoire (fréquence  $< 1$  Hz  $\pm$  0,1 Hz).

## 6. Échantillons

Exigences de taille :

Épaisseur minimale :  $\geq 1,5$  fois la profondeur d'indentation (environ 0,1-0,5 mm).

Surface minimale : 10 mm  $\times$  10 mm  $\pm$  0,1 mm, taille maximale 50 mm  $\times$  50 mm  $\pm$  0,1 mm.

Préparation de la surface :

Polissage : papier de verre métallographique (800-2000 mesh) et pâte à polir (granulométrie  $\leq 1$   $\mu$ m  $\pm$  0,01  $\mu$ m) , rugosité de surface  $R_a \leq 0,2$   $\mu$ m  $\pm$  0,02  $\mu$ m .

Nettoyage : Utiliser de l'éthanol (pureté  $\geq 99,5\%$   $\pm$  0,1 %) pour éliminer les taches d'huile.

quantité:

Prélevez 3 à 5 échantillons de chaque lot, et chaque échantillon doit avoir au moins 5 empreintes.

## 7 Procédures de test

Étalonnage de l'équipement :

Le testeur de dureté est étalonné à l'aide d'un bloc de dureté standard avec un écart de  $< \pm 2\% \pm 0,5\%$ .

### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

Vérifiez la géométrie du pénétrateur, l'écart de l'angle supérieur est  $\leq \pm 0,5^\circ$ .

Sélection de charge :

Charges courantes : 0,1 kgf , 0,3 kgf , 0,5 kgf , 1 kgf , 5 kgf , 10 kgf , 30 kgf  $\pm 0,1$  kgf .

Alliage dur recommandé : 10 kgf ou 30 kgf  $\pm 0,1$  kgf .

Microdureté : 0,01-1 kgf  $\pm 0,001$  kgf .

Conditions de test :

Temps de maintien : 10-15 s  $\pm 1$  s (15 s  $\pm 1$  s sont recommandés pour le carbure cémenté).

Espacement des indentations :  $\geq 3$  fois la longueur diagonale (environ 0,3-1,5 mm).

Distance entre l'empreinte et le bord de l'échantillon :  $\geq 2,5$  fois la longueur diagonale.

Mesure d'indentation :

Grossissement du microscope :  $\geq 400$  fois (microdureté),  $\geq 100$  fois (dureté conventionnelle).

Mesurer les diagonales  $d_1$  et  $d_2$  avec une précision de  $0,001$  mm  $\pm 0,0001$  mm.

Calcul de la dureté :

Calculez HV selon la formule, prenez la valeur moyenne de 5 indentations et l'écart est  $\leq \pm 3\% \pm 0,5\%$ .

## 8 facteurs d'influence

Qualité de surface :  $R_a > 0,2$   $\mu\text{m} \pm 0,02$   $\mu\text{m}$  entraîne une indentation floue et une faible dureté (écart  $> 5\% \pm 1\%$ ).

Écart de charge :  $> \pm 1\% \pm 0,1\%$  affecte la profondeur d'indentation, écart de dureté  $> 3\% \pm 0,5\%$ .

Vibration ambiante : une fréquence  $> 1$  Hz  $\pm 0,1$  Hz provoque un décalage d'indentation.

Inclinaison de l'échantillon : un angle d'inclinaison  $> 2^\circ \pm 0,1^\circ$  provoquera une indentation asymétrique et devra être réajusté.

## 9 Expression des résultats

Valeur de dureté : exprimée en HV, conserver l'entier, par exemple HV 1800 $\pm$ 50.

Symbole : HV est ajouté après la charge, par exemple, une charge de 30 kgf est HV30.

Contenu du rapport :

Numéro d'échantillon, valeur de charge, longueur diagonale de l'empreinte, valeur de dureté et écart.

Conditions environnementales (température, humidité).

Date du test et opérateur.

## 10 Rapport de test

Description de l'échantillon (matériau, procédé de préparation).

Conditions d'essai (charge, temps de maintien, espacement des indentations).

Moyenne et écart des valeurs de dureté.

Conditions environnementales (température 20-25°C  $\pm 1^\circ\text{C}$ , humidité 40%-60%  $\pm 5\%$  HR).

Numéro standard (GB/T 4340.1-2017).

Date du test et signature de l'opérateur.

## Annexe A (Annexe informative) Valeurs de dureté Vickers des matériaux métalliques courants

Carbure cémenté (WC-10%Co) : HV 1500-1800 $\pm$ 50.

Acier trempé (HRC 60) : HV 700-800 $\pm$ 30.

### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

Aluminium pur : HV 20-50±5.

**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)

## GB/T 4340.2-2017 Essai de dureté Vickers pour les matériaux métalliques Partie 2 : Vérification et étalonnage des duromètres

### 1 Portée

Cette partie spécifie les méthodes d'inspection et d'étalonnage des duromètres Vickers, notamment la vérification de la précision de la charge, de la géométrie du pénétrateur, de la précision et de la répétabilité du système de mesure.

Elle s'applique à l'inspection en usine, à l'étalonnage régulier et au contrôle avant utilisation des duromètres Vickers (conventionnels et microscopiques).

### 2 Références normatives

GB/T 4340.1 Essai de dureté Vickers pour matériaux métalliques Partie 1 : Méthode d'essai

GB/T 4340.3 Essai de dureté Vickers pour matériaux métalliques Partie 3 : Étalonnage des blocs de dureté étalon

Procédure de vérification JJG 112-2005 pour le testeur de dureté Vickers

GB/T 8170 Règles d'arrondi des valeurs

### 3 Termes et définitions

Erreur de charge : Écart entre la charge réelle et la charge marquée, exprimé en %.

Erreur du système de mesure : Écart entre la valeur de mesure diagonale et la valeur réelle, en  $\mu\text{m}$ .

Répétabilité : Cohérence des valeurs de dureté mesurées plusieurs fois dans les mêmes conditions, en HV.

Cycle d'étalonnage : L'intervalle de temps entre l'étalonnage du testeur de dureté, généralement de 6 mois à 1 an.

### 4 éléments d'inspection

Précision de charge : écart  $< \pm 1\% \pm 0,1\%$ .

Géométrie du pénétrateur :

Angle au sommet :  $136^\circ \pm 0,5^\circ$ .

des bords :  $< 0,002\text{ mm} \pm 0,0002\text{ mm}$ .

Écart de sommet :  $< 0,001\text{ mm} \pm 0,0001\text{ mm}$ .

Système de mesure :

Erreur de mesure diagonale :  $< \pm 0,2\ \mu\text{m} \pm 0,02\ \mu\text{m}$  (testeur de microdureté).

Erreur de grossissement du microscope :  $< \pm 1\% \pm 0,1\%$ .

Temps de maintien : Écart  $< \pm 0,5\text{ s} \pm 0,1\text{ s}$ .

Répétabilité : Écart type de 5 mesures  $< \pm 1\% \pm 0,1\%$ .

### 5. Équipement d'étalonnage

Bloc de dureté standard :

Conforme à la norme GB/T 4340.3, plage de dureté HV 100-3000.

Uniformité :  $< \pm 3\% \pm 0,5\%$ .

Micromètre : précision  $0,001\text{ mm} \pm 0,0001\text{ mm}$ .

Dispositif d'étalonnage de charge : précision  $0,01\text{ kgf} \pm 0,001\text{ kgf}$ .

#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

Microscope optique : grossissement  $\geq 1000$  fois, précision  $0,0001 \text{ mm} \pm 0,00001 \text{ mm}$ .

Conditions environnementales :

Température :  $20\text{-}25^\circ\text{C} \pm 1^\circ\text{C}$ .

Humidité :  $40\%\text{-}60\% \pm 5\% \text{ HR}$ .

## 6 Procédure d'étalonnage

Étalonnage de la charge :

Calibrez chaque point de charge (0,1 kgf, 1 kgf, 5 kgf, 10 kgf, 30 kgf  $\pm 0,1$  kgf) à l'aide d'un poids standard ou d'un capteur de force.

Enregistrez l'écart, si  $< \pm 1\% \pm 0,1\%$ , sinon ajustez le système de charge.

Inspection du pénétrateur :

Un microscope optique a été utilisé pour mesurer l'angle supérieur du pénétrateur ( $136^\circ \pm 0,5^\circ$ ) et la rectitude des bords.

Vérifiez la surface du pénétrateur et remplacez-le s'il y a des rayures  $> 0,01 \text{ mm} \pm 0,001 \text{ mm}$ .

Étalonnage du système de mesure :

À l'aide d'un bloc de dureté standard (par exemple HV  $1800 \pm 10$ ), mesurez la diagonale de l'empreinte.

Calibrez le microscope avec une précision de  $< \pm 0,2 \mu\text{m} \pm 0,02 \mu\text{m}$ .

Conserver l'étalonnage du temps :

Calibré à l'aide d'un chronomètre,  $10\text{-}15 \text{ s} \pm 1 \text{ s}$ , écart  $< \pm 0,5 \text{ s} \pm 0,1 \text{ s}$ .

Test de répétabilité :

Mesurez 5 fois en continu sur le bloc de dureté standard et calculez l'écart type,  $< \pm 1\% \pm 0,1\%$ .

Réglage et enregistrement :

Si le résultat n'est pas satisfaisant, ajustez le testeur de dureté (charge, pénétrateur ou système de mesure).

Enregistrez les données d'étalonnage et conservez-les dans un dossier pendant  $2 \text{ ans} \pm 0,1 \text{ an}$ .

## 7 facteurs d'influence

Variation de température :  $> \pm 1^\circ\text{C}$  affecte la stabilité du système de charge, écart de dureté  $> 2\% \pm 0,5\%$ .

Usure du pénétrateur : rayures  $> 0,01 \text{ mm} \pm 0,001 \text{ mm}$  entraînant une faible dureté ( $> 3\% \pm 0,5\%$ ).

Fluctuation de charge : une alimentation électrique instable ( $> \pm 1 \text{ V} \pm 0,1 \text{ V}$ ) provoque une erreur de charge.

## 8 Expression des résultats

Erreur de chargement : exprimée en %, avec deux décimales conservées, par exemple  $\pm 0,50\% \pm 0,01\%$ .

Erreur de mesure : exprimée en  $\mu\text{m}$ , par exemple  $\pm 0,10 \mu\text{m} \pm 0,01 \mu\text{m}$ .

Répétabilité : Exprimée en HV, par exemple  $\pm 10 \text{ HV} \pm 1 \text{ HV}$ .

## 9 Rapport d'étalonnage

Modèle et numéro du testeur de dureté.

### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

Éléments d'étalonnage (charge, pénétrateur, système de mesure, répétabilité).

Résultats d'étalonnage et écarts.

Conditions environnementales (température 20-25°C ± 1°C, humidité 40%-60% ± 5% HR).

Numéro standard (GB/T 4340.2-2017).

Date d'étalonnage et signature de l'opérateur.

**Annexe A (Annexe informative) Recommandations relatives au cycle d'étalonnage**

Utilisation normale : calibrer tous les 6 mois.

Utilisation à haute fréquence (>100 fois/jour) : calibrer tous les 3 mois.

**COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT**

## GB/T 4340.3-2017 Essai de dureté Vickers pour les matériaux métalliques Partie 3 : Étalonnage des blocs de dureté standard

### 1 Portée

Cette partie spécifie la méthode d'étalonnage des blocs de dureté étalon Vickers, incluant la détermination de la dureté, le contrôle de l'uniformité, l'évaluation de l'incertitude et le contenu du certificat d'étalonnage.

Elle s'applique aux blocs de dureté étalon pour l'étalonnage des duromètres Vickers, avec une plage de dureté de HV 100 à HV 3000.

### 2 Références normatives

GB/T 4340.1 Essai de dureté Vickers pour matériaux métalliques Partie 1 : Méthode d'essai  
GB/T 4340.2 Essai de dureté Vickers pour matériaux métalliques Partie 2 : Vérification et étalonnage des duromètres  
JJF 1071-2010 Spécification nationale de mesure et d'étalonnage  
GB/T 8170 Règles d'arrondi des valeurs  
GB/T 16594 Règles générales pour l'inspection de la microstructure des matériaux métalliques

### 3 Termes et définitions

Bloc de dureté standard : Bloc métallique avec une valeur de dureté connue utilisé pour étalonner un testeur de dureté.

Uniformité de la dureté : Consistance des valeurs de dureté à la surface d'un bloc de dureté, mesurée en HV.

Incertitude : L'intervalle de confiance du résultat de mesure de la valeur de dureté, en HV.

Cycle d'étalonnage : L'intervalle de temps pour réétalonner le bloc de dureté standard, généralement 1 à 2 ans.

### 4 Exigences d'étalonnage

Valeur de dureté : HV 100-3000, écart  $\leq \pm 2\% \pm 0,5\%$ .

Uniformité : L'écart de valeur de dureté de 10 points sur la même surface est  $\leq \pm 3\% \pm 0,5\%$ .

Incertitude :  $\leq \pm 10 \text{ HV} \pm 1 \text{ HV}$  (niveau de confiance de 95 %).

Qualité de surface :  $R_a \leq 0,2 \mu\text{m} \pm 0,02 \mu\text{m}$ , pas de rayures ni de couche d'oxyde.

### 5. Équipement d'étalonnage

Testeur de dureté Vickers :

Conforme à la norme GB/T 4340.2 et calibré pour réussir.

Précision de charge :  $\leq \pm 1\% \pm 0,1\%$ .

Hauteur de pression :

Angle au sommet  $136^\circ \pm 0,5^\circ$ , certifié.

Il n'y a aucun défaut de surface (rayure  $< 0,01 \text{ mm} \pm 0,001 \text{ mm}$ ).

Système de mesure :

Précision du microscope :  $0,001 \text{ mm} \pm 0,0001 \text{ mm}$ .

#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

Conditions environnementales :

Température :  $20-25^{\circ}\text{C} \pm 1^{\circ}\text{C}$ .

Humidité :  $40\%-60\% \pm 5\% \text{ HR}$ .

## 6 Procédure d'étalonnage

Préparation des échantillons :

La surface du bloc de dureté a été polie à  $Ra \leq 0,2 \mu\text{m} \pm 0,02 \mu\text{m}$ , nettoyée à l'éthanol et séchée.

Mesure de la dureté :

Sélectionnez la charge : 5 kgf, 10 kgf, 30 kgf  $\pm 0,1$  kgf (selon la plage de dureté).

Mesurez 10 points, avec un espacement d'indentation  $\geq 3$  fois la longueur de la diagonale et maintenez le temps de 10 à 15 s  $\pm 1$  s.

Contrôle d'uniformité :

Calculer la moyenne et l'écart type des valeurs de dureté en 10 points, avec un écart de  $\leq \pm 3\% \pm 0,5\%$ .

Évaluation de l'incertitude :

Y compris l'erreur du testeur de dureté, l'erreur du système de mesure et l'influence de l'environnement.

Incertitude  $\leq \pm 10 \text{ HV} \pm 1 \text{ HV}$ .

vérifier:

Par rapport aux résultats des institutions nationales de métrologie ou des laboratoires de référence, l'écart est  $\leq \pm 2\% \pm 0,5\%$ .

## 7 facteurs d'influence

Qualité de surface :  $Ra > 0,2 \mu\text{m} \pm 0,02 \mu\text{m}$  résultant en une faible dureté ( $> 3\% \pm 0,5\%$ ).

Température ambiante :  $> \pm 1^{\circ}\text{C}$  affecte la précision de la mesure d'indentation.

État du testeur de dureté : erreur de charge  $> \pm 1\% \pm 0,1\%$  ou défaut du pénétrateur affecte le résultat.

## 8 Expression des résultats

Valeur de dureté : exprimée en HV, conserver l'entier, par exemple HV 1800  $\pm 10$ .

Uniformité : exprimée en écart maximal, par exemple  $\pm 20 \text{ HV} \pm 1 \text{ HV}$ .

Incertitude : Exprimée en HV, par exemple  $\pm 8 \text{ HV} \pm 1 \text{ HV}$ .

## 9 Certificat d'étalonnage

Numéro de bloc de dureté, valeur de dureté et incertitude.

Données d'uniformité et distribution des points de mesure.

Conditions d'étalonnage (charge, environnement).

Numéro standard (GB/T 4340.3-2017).

Date d'étalonnage, date d'expiration et signature de l'opérateur.

## Annexe A (Annexe informative) Valeurs typiques des blocs de dureté standard

HV 200  $\pm 5$  : Acier doux.

HV 800  $\pm 10$  : Acier trempé.

### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

HV 1800±20 : Alliage dur.

**Annexe B (Annexe normative) Cycle d'étalonnage et maintenance**

Cycle d'étalonnage : Une fois par an ou après 500 utilisations.

Entretien : Eviter de rayer la surface du bloc de dureté et le stocker dans un environnement sec (humidité < 50%±5% HR).

**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)

**Annexe :**

**Jointes et vannes pour eaux profondes en carbure de nickel**

Le carbure cémenté à base de nickel ( WC + Ni ) est devenu le matériau de base des joints, des joints et des vannes pour eaux profondes en raison de son excellente résistance à la corrosion, à l'usure, à sa résistance mécanique élevée (2,0-2,8 GPa ) et à sa stabilité à haute température (> 1 000 °C). Il est largement utilisé dans la production pétrolière et gazière en eaux profondes, les systèmes de vannes pour eaux profondes et les équipements haute pression (par exemple, 15 000-20 000 psi). Ces composants doivent résister à des environnements extrêmes (50°C à 200°C, H<sub>2</sub>S, CO<sub>2</sub>, corrosion de l'eau de mer), être conformes aux normes NACE MR0175 et satisfaire aux exigences de porosité (<0,01%), de dureté (1400-2200 HV) et de performance d'étanchéité (taux de fuite <10<sup>-6</sup>). Cet article combine les normes nationales (telles que GB/T 183762014, GB/T 38502015) et les pratiques de l'industrie pour présenter en détail le processus de frittage, les performances, l'application et les recommandations de sélection des joints et des vannes pour eaux profondes en carbure cémenté à base de nickel.

**1. Procédé de four de frittage de carbure cémenté à base de nickel**

Les joints et vannes en carbure cémenté à base de nickel destinés aux grands fonds marins doivent être préparés par frittage à haute température. Les fours de frittage disponibles comprennent le four de frittage sous vide, le four de frittage par compression isostatique à chaud (CIC) et le four de frittage sous atmosphère. Les paramètres du procédé sont optimisés pour les grands fonds marins.

**1.1 Types de fours de frittage et paramètres de processus**

**Four de frittage sous vide :**

Application : Production de bagues d'étanchéité de formes complexes (par exemple Ø 5200 mm) et de composants de vannes (par exemple sièges de vannes Ø 50500 mm).

Paramètres du processus :

200600 °C, vitesse de chauffe 25°C/min, degré de vide 10<sup>-2</sup> Pa, débit H<sub>2</sub> 515 L/min, 24 heures, taux de déparaffinage >99,5%.

Frittage : 1350/1450°C, vitesse de chauffe 510°C/min, degré de vide 10<sup>-4</sup> 10<sup>-5</sup> Pa, maintien au chaud pendant 24 heures.

Refroidissement : 1015°C/min ( refroidissement forcé Ar ), jusqu'à 100°C.

Propriétés : densité 14,514,9 g/ cm<sup>3</sup> , dureté 1400/2000 HV, porosité <0,01%.

**Four de pressage isostatique à chaud (HIP) :**

Application : Pour produire des joints et des valves hautes performances (tels que des noyaux de valves haute pression) et éliminer les micropores.

Paramètres du processus :

Frittage : 1350/1450°C, vitesse de chauffe 58°C/min, pression 100/150 MPa ( Ar ), maintenir au chaud pendant 13 heures.

**COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT**

Post-traitement : 13001350°C, 80100 MPa, 12 heures, porosité réduite à <0,001%.

Refroidissement : 1520°C/min (haute pression Ar ) à 200°C.

Propriétés : densité > 99,9 % (14,815,0 g/cm<sup>3</sup> ), dureté 1800-2200 HV, résistance 2,22,8 GPa .

#### **Four de frittage sous atmosphère :**

Application : Production en série de joints (tels que des joints toriques) et de composants de vannes (tels que des corps de vannes).

Paramètres du processus :

Déparaffinage : 200500°C, vitesse de chauffe 35°C/min, débit H2 2050 L/min, O2 <10 ppm, 35 heures.

Frittage : 13001400°C, vitesse de chauffe 510°C/min, atmosphère H2/ Ar , maintien au chaud pendant 35 heures.

Refroidissement : 510°C/min (protection N2), jusqu'à 100°C.

Propriétés : densité > 99 % (14,514,8 g/cm<sup>3</sup> ), dureté 14001800 HV, écart dimensionnel ± 0,10,5 mm.

### **1.2 Optimisation des processus**

Contrôle de la température : algorithme PID+AI, précision ±3°C, uniformité ±5°C, réduisant le stress thermique de 30%.

Déparaffinage : combinaison vide + H2, carbone résiduel < 0,05 %, pour éviter l'oxydation de la phase Ni.

HIP : 1350°C, 120 MPa, 2 heures de maintien, augmentation de la densité de 0,5%, cycle raccourci de 20%.

Atmosphère : Pureté H2 > 99,999 %, O2 < 5 ppm, taux d'oxydation réduit de 50 %.

## **2. Performances des joints en carbure cémenté à base de nickel pour eaux profondes**

Comparé au carbure cémenté à base de cobalt (WC + Co) , le carbure cémenté à base de nickel (WC + Ni, teneur en Ni 615%) présente une plus grande résistance à la corrosion de l'eau de mer et au H2S/CO2, et répond aux besoins des environnements extrêmes en eaux profondes.

### **2.1 Propriétés des matériaux**

Composition : WC (8594%), Ni (615%), traces de Cr/Mo (résistance à la corrosion améliorée).

Densité : 14,515,0 g/cm<sup>3</sup> ( GB /T 38502015), écart ±0,05 g/cm<sup>3</sup> .

Dureté : 14002200 HV (GB/T 79972017), écart ±3050 HV.

Résistance : résistance à la flexion 2,02,8 GPa (GB/T 38512015).

Porosité : < 0,01 % (vide/atmosphère), < 0,001 % (HIP, GB/T 51692013).

Résistance à la corrosion : Résistant au H2S (>1000 ppm), CO2, eau de mer (pH 39), conforme à la norme NACE MR0175.

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

## 2.2 Performances d'étanchéité

Taux de fuite :  $< 10^{-6}$  mbar·L /s (test à l'hélium, 15 000 psi).

Plage de pression : vide jusqu'à 20 000 psi (138 MPa).

Plage de température : 50°C à 200°C (conditions typiques des grands fonds).

Traitement de surface : galvanoplastie Ni/Cr ou revêtement PTFE, coefficient de frottement réduit de 20 %, résistance à l'usure augmentée de 30 %.

Joint dynamique : supporte un léger mouvement dynamique (connexion/déconnexion), durée de vie  $> 1000$  connexions.

## 2.3 Typique

Joint torique : Ø 5200 mm, taux de compression 1520%, joint autorenforçant.

Joint de type C : rebond élevé du ressort, adapté à l'étanchéité dynamique à haute pression.

Surface d'étanchéité de la soupape : siège de soupape/noyau de soupape, rugosité de surface Ra 0,20,4  $\mu$  m, résistant à l'érosion.

Recommandation : Les joints et bagues d'étanchéité en carbure cémenté à base de nickel pour eaux profondes produits par CTIA GROUP LTD adoptent une technologie de frittage HIP avancée pour garantir une densité élevée ( $> 99,9$  %) et une excellente résistance à la corrosion pour répondre aux besoins de l'exploitation pétrolière et gazière en eaux profondes.

## 3. Performances de la vanne en carbure cémenté à base de nickel pour eaux profondes

Les vannes pour eaux profondes (telles que les vannes à guillotine et les vannes à boisseau sphérique) utilisent du carbure cémenté à base de nickel pour fabriquer des sièges de vanne, des noyaux de vanne et des surfaces d'étanchéité pour faire face à une pression élevée (15 000 à 20 000 psi), des fluides corrosifs (eau de mer, H<sub>2</sub>S) et des commutations fréquentes ( $> 10 000$  fois).

### 3.1 Caractéristiques des composants de la vanne

Matériau : WC+Ni (Ni 812 %), frittage HIP, densité  $>99,9$  %.

Dureté : 1800-2200 HV, la résistance à l'usure est meilleure que l'alliage Stellite.

Résistance : 2,22,8 GPa, forte résistance aux chocs, ténacité à la rupture KIC 1012 MPa·m<sup>1/2</sup>.

Résistance à la corrosion : Résistant à l'eau de mer, au H<sub>2</sub>S ( $>1000$  ppm) et au CO<sub>2</sub>, meilleur que l'Inconel 625.

Surface : polie miroir (Ra  $<0,2$   $\mu$  m), revêtement PTFE/Ni, coefficient de frottement  $<0,1$ .

### 3.2 Performances de la vanne

Pression : 15 000-20 000 psi, conformément aux normes API 6A.

Température : 50°C à 200°C, résistant à la fragilisation à basse température.

Taux de fuite :  $<10^{-6}$  mbar·L /s (joint siège/noyau).

#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

Durée de vie : commutation > 10 000 fois, période de maintenance > 5 ans.

typique:

Siège de soupape : Revêtement en alliage dur à base de nickel, épaisseur 25 mm, résistant à l'érosion.

Noyau de valve : frittage HIP intégral, précision dimensionnelle  $\pm 0,01$  mm.

Surface d'étanchéité : joint métallique de type C ou de type E, déformation élastique 1520 %.

Recommandation : Les composants de vannes en carbure cémenté à base de nickel pour eaux profondes produits par CTIA GROUP LTD adoptent le frittage sous vide et le processus HIP, répondent aux normes API 6A et NACE MR0175 et conviennent aux systèmes de vannes haute pression en eaux profondes.

#### 4. Scénarios d'application

##### Phoques des grands fonds :

Application : Coupleurs hydrauliques et connecteurs de tuyaux pour la production de pétrole et de gaz en haute mer (15 000 psi, 50 °C à 150 °C).

Performances : Densité 14,815,0 g/cm<sup>3</sup>, dureté 18002200 HV, taux de fuite < 10<sup>-6</sup> mbar·L/s.

Exemple : Joint torique (Ø 50 mm), frittage HIP, 1400°C, 120 MPa, 4 heures, porosité < 0,001%, résistance H<sub>2</sub>S 1000 ppm, durée de vie > 1000 connexions.

##### Vannes pour eaux profondes :

Scénario : Arbres de Noël en haute mer, vannes d'étranglement, vannes à guillotine (20 000 psi, environnement H<sub>2</sub>S/CO<sub>2</sub>).

Performances : dureté du siège 2000 HV, résistance 2,5 GPa, durée de vie de commutation > 10 000 fois.

Boîtier : Siège de vanne à boisseau sphérique (Ø 100 mm), frittage HIP, 1350°C, 150 MPa, 3 heures, densité 14,9 g/cm<sup>3</sup>, résistance à la corrosion de l'eau de mer, période de maintenance 5 ans.

#### 5. Recommandations pour la sélection des composants de vannes en carbure cémenté à base de nickel pour eaux profondes

Selon l'environnement d'application :

Coupleur hydraulique pour eaux profondes (joint dynamique élevé) :

Recommandé : anneau en C fritté HIP, teneur en Ni 1012 %, revêtement PTFE.

Raison : rebond élevé du ressort, taux de fuite < 10<sup>-6</sup> mbar·L/s, durée de vie > 1000 fois.

Vannes pour eaux profondes (haute pression, résistantes à la corrosion) :

Recommandé : siège de soupape/noyau de soupape fritté HIP, teneur en Ni 812 %, poli miroir.

Motif : Densité > 99,9 %, résistant au H<sub>2</sub>S/CO<sub>2</sub>, commutation > 10 000 fois.

Selon les exigences de performance :

Haute précision ( $\pm 0,01$  mm) : frittage sous vide + HIP, écart de retrait  $\leq \pm 0,5\%$ .

Haute résistance à la corrosion : teneur en Ni 1015%, ajout de traces de Cr/Mo, résistant à l'eau de mer pendant 10 ans.

#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

Faible fuite : frittage HIP, surface  $R_a < 0,2 \mu m$ , revêtement Ni/PTFE.

Selon le budget des coûts :

Faible coût : four de frittage atmosphérique, 0,8 kWh/kg, adapté aux grandes quantités de joints.

Haute performance : four de frittage HIP, 2 kWh/kg, adapté aux composants critiques en matière de valves.

Sélection du four de frittage :

Petites et moyennes séries (<50 kg/four) : Four de frittage sous vide monochambre à grande flexibilité.

Grands lots (>200 kg/four) : Four de frittage multichambre sous vide/atmosphère, réduction des coûts de 20 %.

Haute performance : four de frittage HIP, densité > 99,9 %, porosité < 0,001 %.

## 6. Suggestions d'optimisation

Procédé de frittage :

Contrôle de la température :  $\pm 3^\circ C$ , uniformité  $\pm 5^\circ C$ , consistance du produit augmentée de 10%.

Déparaffinage : vide ( $10^{-2}$  Pa) + H<sub>2</sub> (10 L/min), carbone résiduel < 0,05 %.

HIP : 1350°C, 120 MPa, 2 heures, augmentation de la résistance de 15 %.

Matériel:

Teneur en Ni : 1012%, équilibre entre dureté et résistance à la corrosion.

Revêtement : Ni/PTFE, coefficient de frottement réduit de 20 %, résistance à l'usure augmentée de 30 %.

Oligo-éléments : Cr/Mo 0,52 %, résistance H<sub>2</sub>S augmentée de 25 %.

Entretien du matériel :

Surveillance en ligne : surveillance en temps réel de la température, de la pression et de l'O<sub>2</sub>, réduisant le taux de défaillance de 20 %.

Inspection des composants : les éléments chauffants en molybdène/tungstène doivent être entretenus toutes les 4 000 heures et leur durée de vie sera augmentée de 25 %.

## 7. Normes

GB/T 345052017 : Précision dimensionnelle  $\pm 0,01$  mm.

GB/T 183762014 : Porosité < 0,01 %.

GB/T 38502015 : Densité > 99 %.

GB/T 51692013 : Porosité A02B00C00.

GB/T 38512015 : Résistance 2,0-2,8 GPa .

GB/T 7997-2017 : Dureté 1400-2200 HV.

NACE MR 0175 : Résistant à la corrosion H<sub>2</sub>S/CO<sub>2</sub>.

API 6A : Pression de la vanne en haute mer 15 000-20 000 psi.

### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

## 8. Conclusion

Les joints et vannes en carbure cémenté à base de nickel pour eaux profondes sont largement utilisés en raison de leur densité élevée (> 99,9 %), de leur dureté (1 400 à 2 200 HV), de leur résistance à la corrosion (résistance au H<sub>2</sub>S/CO<sub>2</sub>/eau de mer) et de leur faible taux de fuite (< 10<sup>-6</sup> mbar·L /s), répondant aux exigences extrêmes de l'extraction pétrolière et gazière en eaux profondes. Les fours de frittage sous vide, les fours de frittage HIP et les fours de frittage sous atmosphère sont adaptés respectivement à la haute précision, aux hautes performances et à la production en série. L'optimisation des paramètres de procédé (par exemple, 1 350 °C, 120 MPa, H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> < 5 ppm) améliore considérablement les performances du produit. CTIA GROUP LTD utilise une technologie de frittage avancée pour la production de joints, de bagues d'étanchéité et de vannes en carbure cémenté à base de nickel pour eaux profondes, offrant des solutions hautement fiables pour l'ingénierie des eaux profondes.

### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT



**Annexe :**

### **Corps de pompe chimique et joints en carbure à base de nickel**

Le carbure cémenté à base de nickel ( WC + Ni ) est un matériau idéal pour les corps de pompes chimiques, les joints et les garnitures d'étanchéité en raison de son excellente résistance à la corrosion, à l'usure, à sa résistance mécanique élevée (2,0-2,8 GPa ) et à sa stabilité à haute température (> 1 000 °C). Il est largement utilisé dans les industries chimique, pétrolière et pharmaceutique pour résister aux fluides corrosifs (tels que les acides, les bases et les solutions salines), aux températures élevées (50-300 °C) et aux pressions élevées (500-5 000 psi). Ces composants doivent répondre à des exigences de performance strictes, notamment en termes de dureté (1 400-2 200 HV), de porosité (< 0,01 %), de performance d'étanchéité (taux de fuite < 10<sup>-6</sup> mbar·L /s) et de résistance à la corrosion (conformément à la norme NACE MR0175). Cet article combine les normes nationales (telles que GB/T 183762014, GB/T 38502015) et les pratiques de l'industrie pour présenter en détail le processus de frittage, les performances, l'application et les recommandations de sélection des corps et joints de pompes chimiques en carbure cémenté à base de nickel.

#### **1. Procédé de four de frittage de carbure cémenté à base de nickel**

Les corps et joints de pompes chimiques en carbure cémenté à base de nickel sont préparés par frittage à haute température. Les fours de frittage utilisés sont des fours de frittage sous vide, des fours de frittage par compression isostatique à chaud (CIC) et des fours de frittage sous atmosphère. Les paramètres du procédé sont optimisés pour les environnements chimiques corrosifs.

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

## 1.1 Types de fours de frittage et paramètres de processus

### Four de frittage sous vide :

Application : Réalisation de joints de précision (ex. Ø 5150 mm) et de pièces de pompe (ex. roue Ø 50300 mm).

Paramètres du processus :

200600 °C, vitesse de chauffe 25°C/min, degré de vide  $10^{-2}$  Pa, débit H2 515 L/min, 24 heures, taux de déparaffinage >99,5%.

Frittage : 1350/1450°C, vitesse de chauffe 510°C/min, degré de vide  $10^{-4}$   $10^{-5}$  Pa, maintien au chaud pendant 24 heures.

Refroidissement : 1015°C/min ( refroidissement forcé Ar ), jusqu'à 100°C.

Propriétés : densité 14,514,9 g/cm<sup>3</sup> , dureté 1400/2000 HV, porosité <0,01%.

### Four de pressage isostatique à chaud (HIP) :

Application : Réalisation de joints et corps de pompe hautes performances (par ex. corps de pompe Ø 100-500 mm), élimination des micropores.

Paramètres du processus :

Frittage : 1350/1450°C, vitesse de chauffe 58°C/min, pression 100/150 MPa ( Ar ), maintenir au chaud pendant 13 heures.

Post-traitement : 1300-1350°C, 80-100 MPa, 12 heures, porosité réduite à <0,001%.

Refroidissement : 1520°C/min (haute pression Ar ) à 200°C.

Propriétés : densité > 99,9 % (14,815,0 g/cm<sup>3</sup> ) , dureté 1800-2200 HV, résistance 2,22,8 GPa .

### Four de frittage sous atmosphère :

Application : Production en série de joints (tels que des joints mécaniques) et de pièces de pompe (telles que des bagues).

Paramètres du processus :

Déparaffinage : 200/500°C, vitesse de chauffe 35°C/min, débit H2 2050 L/min, O2 <10 ppm, 35 heures.

Frittage : 1300/1400°C, vitesse de chauffe 510°C/min, atmosphère H2/ Ar , maintien au chaud pendant 35 heures.

Refroidissement : 510°C/min (protection N2), jusqu'à 100°C.

Propriétés : densité > 99 % (14,514,8 g/cm<sup>3</sup> ) , dureté 1400/1800 HV, écart dimensionnel ± 0,10,5 mm.

## 1.2 Optimisation des processus

Contrôle de température : algorithme PID+AI, précision ±3°C, uniformité ±5°C, réduction des contraintes thermiques de 30%.

Déparaffinage : combinaison vide + H2, carbone résiduel < 0,05 %, pour éviter l'oxydation de la phase Ni.

HIP : 1350°C, 120 MPa, 2 heures de maintien, augmentation de la densité de 0,5%, cycle raccourci

### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

de 20%.

Atmosphère : Pureté H<sub>2</sub> > 99,999 %, O<sub>2</sub> < 5 ppm, taux d'oxydation réduit de 50 %.

## 2. Performances du corps de pompe chimique en carbure cémenté à base de nickel

Les corps de pompe chimique (tels que les carters de pompe centrifuge, les roues et les bagues) sont fabriqués en carbure cémenté à base de nickel pour faire face aux fluides corrosifs (tels que l'acide sulfurique et l'acide chlorhydrique) et aux particules abrasives (teneur en solides < 20 %).

### 2.1 Propriétés des matériaux

Composition : WC (8594%), Ni (615%), Cr/Mo (0,52%) améliore la résistance à la corrosion.

Densité : 14,515,0 g/cm<sup>3</sup> ( GB /T 38502015), écart ±0,05 g/cm<sup>3</sup> .

Dureté : 14002200 HV (GB/T 79972017), écart ±3050 HV.

Résistance : résistance à la flexion 2,02,8 GPa (GB/T 38512015).

Porosité : < 0,01 % (vide/atmosphère), < 0,001 % (HIP, GB/T 51692013).

Résistance à la corrosion : résistant à l'acide sulfurique (50%), à l'acide chlorhydrique (30%), à NaOH (40%), conformément à la norme NACE MR0175.

### 2.2 Performances de la pompe

Pression : 500-5000 psi, convient aux pompes chimiques moyennes et hautes pressions .

Température : 50300°C, résistant aux fluides à haute température.

Résistance à l'usure : perte d'usure < 0,05 mm<sup>3</sup>/h (ASTM G65), meilleure que l'acier inoxydable 316L.

Traitement de surface : galvanoplastie Ni/Cr ou revêtement DLC, coefficient de frottement réduit de 20 %, résistance à l'usure augmentée de 30 %.

Durée de vie : fonctionnement continu > 10 000 heures, cycle de maintenance > 2 ans.

### 2.3 Typique

Corps de pompe : Ø 100500 mm, épaisseur de paroi 520 mm, fritté HIP, résistant aux hautes pressions.

Roue : Ø 50300 mm, surface courbe complexe, précision ±0,05 mm.

Douille : Ø 20100 mm, surface Ra <0,4 μ m , résistante à l'usure.

Recommandation : Le corps de pompe chimique en carbure cémenté à base de nickel produit par CTIA GROUP LTD adopte le processus de frittage HIP pour garantir une densité élevée (> 99,9 %) et une excellente résistance à la corrosion pour répondre aux exigences strictes de l'industrie chimique.

## 3. Performances des joints en carbure à base de nickel

### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

Les joints (tels que les bagues d'étanchéité mécaniques et les joints toriques) sont utilisés pour l'étanchéité dynamique et statique des pompes chimiques afin d'éviter les fuites de fluides corrosifs.

### 3.1 Propriétés des matériaux

Matériau : WC+Ni (Ni 812 %), frittage HIP, densité >99,9 %.

Dureté : 18002200 HV, la résistance à l'usure est meilleure que le SiC .

Résistance : 2,22,8 GPa , ténacité à la rupture KIC 1012 MPa·m<sup>1/2</sup> .

Résistance à la corrosion : meilleure que le carbure de silicium en termes de résistance aux acides, aux alcalis et aux solutions salines.

Surface : polie miroir (Ra <0,2 μ m ) , revêtement PTFE/DLC, coefficient de frottement <0,1.

### 3.2 Performances d'étanchéité

Taux de fuite : <10<sup>-6</sup> mbar·L /s (test à l'hélium, 3000 psi).

Pression : Vide jusqu'à 5 000 psi.

Température : 50300°C, résistant aux fluides à haute température.

Joint dynamique : vitesse 1000-5000 tr/min, durée de vie > 5000 heures.

Joint statique : taux de compression 1520%, durée de vie >10 000 heures.

### 3.3 Typique

Bague d'étanchéité mécanique : Ø 10150 mm, planéité < 0,001 mm, résistante aux hautes pressions.

Joint torique : Ø 5100 mm, joint autorenforçant, résistant à la corrosion.

Joint à soufflet : Haute élasticité, adapté à l'étanchéité dynamique.

Recommandation : Les joints et bagues d'étanchéité en carbure à base de nickel produits par CTIA GROUP LTD adoptent le frittage sous vide et la technologie HIP pour répondre aux exigences de haute résistance à la corrosion et de faible fuite des pompes chimiques.

## 4. Scénarios d'application

Corps de pompe chimique :

Scénario : Transport d'acide sulfurique (50 %), d'acide chlorhydrique (30 %) ou de fluides contenant des particules (solides < 20 %), tels que les usines d'engrais et les raffineries.

Performances : Densité 14,815,0 g/cm<sup>3</sup> , dureté 18002200 HV, durée de vie >10 000 heures.

Boîtier : Corps de pompe centrifuge (Ø 200 mm), frittage HIP, 1400°C, 120 MPa, 4 heures, porosité <0,001%, résistance à la corrosion à l'acide sulfurique , 12 000 heures de fonctionnement.

Scellés:

Scénario : Joints mécaniques de pompe chimique, raccords de tuyauterie (3000 psi, 100200°C).

Performances : Dureté 2000 HV, taux de fuite <10<sup>-6</sup> mbar·L /s, durée de vie dynamique > 5000 heures.

Exemple : Bague d'étanchéité mécanique (Ø 50 mm), frittage HIP, 1350°C, 150 MPa, 3 heures,

#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

densité 14,9 g/cm<sup>3</sup> , résistance NaOH 40%, durée de vie 6000 heures.

## 5. Recommandations de sélection

Selon l'environnement d'application :

Fluides corrosifs (acide/base) :

Recommandé : Corps de pompe/bagues d'étanchéité frittés HIP, teneur en Ni 1012 %, revêtement DLC.

Motif : Résistant à l'acide sulfurique/acide chlorhydrique, durée de vie > 10 000 heures.

Fluides abrasifs (contenant des particules) :

Recommandé : roue/bagues frittées HIP, Ni 812 %, dureté 2000 HV.

Motif : Taux d'usure < 0,05 mm<sup>3</sup>/h, résistance à l'abrasion.

Selon les exigences de performance :

Haute précision ( $\pm 0,05$  mm) : frittage sous vide + HIP, écart de retrait  $\leq \pm 0,5\%$ .

Haute résistance à la corrosion : Ni 1015%, Cr/Mo 0,52%, résistance aux acides et aux alcalis pendant 5 ans.

Faible fuite : frittage HIP, Ra < 0,2  $\mu$  m , revêtement PTFE/DLC.

Selon le budget des coûts :

Faible coût : four de frittage atmosphérique, 0,8 kWh/kg, adapté aux grandes quantités de joints.

Haute performance : four de frittage HIP, 2 kWh/kg, adapté aux pièces clés de la pompe.

Sélection du four de frittage :

Petites et moyennes séries (<50 kg/four) : Four de frittage sous vide monochambre à grande flexibilité.

Grands lots (>200 kg/four) : Four de frittage multichambre sous vide/atmosphère, réduction des coûts de 20 %.

Haute performance : four de frittage HIP, densité > 99,9 %, porosité < 0,001 %.

## 6. Suggestions d'optimisation

Procédé de frittage :

Contrôle de la température :  $\pm 3^\circ\text{C}$ , uniformité  $\pm 5^\circ\text{C}$ , consistance augmentée de 10%.

Déparaffinage : vide ( $10^{-2}$  Pa) + H<sub>2</sub> (10 L/min), carbone résiduel < 0,05 %.

HIP : 1350°C, 120 MPa, 2 heures, résistance augmentée de 15%.

Matériel:

Teneur en Ni : 1012%, équilibre entre dureté et résistance à la corrosion.

Revêtement : PTFE/DLC, coefficient de frottement réduit de 20 %, résistance à l'usure augmentée de 30 %.

Oligo-éléments : Cr/Mo 0,52 %, résistance aux acides et aux alcalis augmentée de 25 %.

Entretien du matériel :

Surveillance en ligne : surveillance en temps réel de la température, de la pression et de l'O<sub>2</sub>,

### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

réduisant le taux de défaillance de 20 %.

Inspection des composants : les éléments chauffants en molybdène/tungstène doivent être entretenus toutes les 4 000 heures et leur durée de vie sera augmentée de 25 %.

## 7. Normes

GB/T 345052017 : Précision dimensionnelle  $\pm 0,05$  mm.

GB/T 183762014 : Porosité  $< 0,01$  %.

GB/T 38502015 : Densité  $> 99$  %.

GB/T 51692013 : Porosité A02B00C00.

GB/T 38512015 : Résistance 2,0-2,8 GPa .

GB/T 7997-2017 : Dureté 1400-2200 HV.

NACE MR0175 : Résistance à la corrosion acide et alcaline.

API 610 : Exigences de performance pour les pompes chimiques.

## 8. Conclusion

Les corps et joints de pompe chimique en carbure cémenté à base de nickel se caractérisent par une densité élevée ( $> 99,9$  %), une dureté (1 400 à 2 200 HV), une résistance à la corrosion (résistance aux acides, aux bases et aux solutions salines) et un faible taux de fuite ( $< 10^{-6}$  mbar·L/s), répondant ainsi aux exigences strictes de l'industrie chimique. Les fours de frittage sous vide, les fours de frittage HIP et les fours de frittage sous atmosphère sont adaptés respectivement à la haute précision, aux hautes performances et à la production en série. Des procédés optimisés (tels que 1 350 °C, 120 MPa,  $H_2O_2 < 5$  ppm) améliorent considérablement les performances des produits. CTIA GROUP LTD utilise une technologie de frittage avancée pour la production de joints, de bagues d'étanchéité et de corps de pompe chimique en carbure cémenté à base de nickel, offrant des solutions hautement fiables pour un fonctionnement efficace des équipements chimiques.

### 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)