

Encyclopédie du borure de tungstène

中钨智造科技有限公司

CTIA GROUP LTD

CTIA GROUP LTD

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

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

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

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

PRÉSENTATION DU GROUPE CTIA

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

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

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

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



COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

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

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

Table des matières

Chapitre 1 Introduction

- 1.1 Aperçu du borure de tungstène
- 1.2 Contexte de la recherche et importance du borure de tungstène
- 1.3 Développement historique du borure de tungstène
- 1.4 Structure et instructions du livre sur le borure de tungstène

Chapitre 2 Propriétés chimiques et physiques du borure de tungstène

- 2.1 Composition chimique du borure de tungstène (WB, WB₂, W₂B, etc.)
- 2.2 Structure cristalline et caractéristiques de liaison du borure de tungstène
- 2.3 Thermodynamique et stabilité du borure de tungstène
- 2.4 Propriétés électriques et magnétiques du borure de tungstène
- 2.5 Propriétés mécaniques du borure de tungstène (dureté, ténacité)

Chapitre 3 Étude théorique sur le borure de tungstène

- 3.1 Analyse de la théorie fonctionnelle de la densité (DFT) du borure de tungstène
- 3.2 Structure électronique et théorie des bandes du borure de tungstène
- 3.3 Propriétés de surface et d'interface du borure de tungstène
- 3.4 Défauts et effets dopants du borure de tungstène
- 3.5 Applications de la simulation informatique du borure de tungstène

Chapitre 4 Matières premières et ressources du borure de tungstène

- 4.1 Ressources minérales en tungstène et en bore des matières premières de borure de tungstène
- 4.2 Technologie de purification des matières premières de borure de tungstène
- 4.3 Chaîne d'approvisionnement mondiale du borure de tungstène et impact géopolitique
- 4.4 Durabilité des ressources en borure de tungstène et substituts

Chapitre 5 Technologie de préparation du borure de tungstène

- 5.1 Synthèse en phase solide à haute température du borure de tungstène
- 5.2 Dépôt chimique en phase vapeur (CVD) du borure de tungstène
- 5.3 Synthèse assistée par plasma de borure de tungstène
- 5.4 Alliage mécanique et broyage à boulets de borure de tungstène
- 5.5 Préparation de nanomatériaux à base de borure de tungstène
- 5.6 Optimisation du procédé et mise à l'échelle du borure de tungstène

Chapitre 6 Contrôle de la qualité et inspection du borure de tungstène

- 6.1 Analyse de la composition chimique du borure de tungstène (ICP-MS, XRF)
- 6.2 Détection de la structure cristalline du borure de tungstène (DRX, TEM)
- 6.3 Morphologie de surface et analyse granulométrique du borure de tungstène (MEB, AFM)
- 6.4 Test de performance du borure de tungstène (dureté, conductivité)
- 6.5 Norme de qualité du borure de tungstène (ISO, GB/T)

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

Chapitre 7 Application du borure de tungstène dans les revêtements durs

- 7.1 Avantages de performance du revêtement en borure de tungstène
- 7.2 Application du revêtement en borure de tungstène dans les outils de coupe
- 7.3 Application du revêtement en borure de tungstène dans les moules
- 7.4 Préparation et optimisation du revêtement en borure de tungstène
- 7.5 Performance du revêtement en borure de tungstène dans un environnement d'usure et de corrosion
- 7.6 Marché et tendances futures du revêtement au borure de tungstène

Chapitre 8 Application du borure de tungstène dans les matériaux à haute température

- 8.1 Pièces aérospatiales haute température en borure de tungstène
- 8.2 Application du borure de tungstène dans les fours à haute température et les barrières thermiques
- 8.3 Propriétés de conductivité thermique et de dilatation thermique du borure de tungstène
- 8.4 Résistance à l'oxydation et à la corrosion du borure de tungstène dans un environnement à haute température
- 8.5 Technologie de préparation des matériaux à base de borure de tungstène à haute température
- 8.6 Perspectives d'application et défis des matériaux haute température à base de borure de tungstène

Chapitre 9 Application du borure de tungstène dans les appareils électroniques

- 9.1 Application du borure de tungstène dans les films conducteurs
- 9.2 Application du borure de tungstène dans les matériaux d'électrodes
- 9.3 Application du borure de tungstène dans les capteurs
- 9.4 Potentiel du borure de tungstène dans les dispositifs semi-conducteurs
- 9.5 Technologie de préparation des dispositifs électroniques au borure de tungstène
- 9.6 Tendances du marché et du développement des dispositifs électroniques au borure de tungstène

Chapitre 10 Catalyse et applications chimiques du borure de tungstène

- 10.1 Application du borure de tungstène en électrocatalyse
- 10.2 Application du borure de tungstène en photocatalyse
- 10.3 Application du borure de tungstène dans la catalyse des réactions chimiques
- 10.4 Chimie de surface et sites actifs des catalyseurs au borure de tungstène
- 10.5 Préparation et optimisation du catalyseur au borure de tungstène
- 10.6 Perspectives industrielles et défis de l'application catalytique du borure de tungstène

Chapitre 11 Applications biomédicales du borure de tungstène

- 11.1 Application du borure de tungstène dans les revêtements biomédicaux
- 11.2 Application des nanoparticules de borure de tungstène à l'administration de médicaments
- 11.3 Application du borure de tungstène dans les biocapteurs
- 11.4 Biocompatibilité et sécurité du borure de tungstène

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

11.5 Technologie de préparation des matériaux biomédicaux en borure de tungstène

11.6 Perspectives et défis des applications biomédicales du borure de tungstène

Chapitre 12 Application énergétique du borure de tungstène

12.1 Application du borure de tungstène dans les matériaux de batterie

12.2 Application du borure de tungstène dans les piles à combustible

12.3 Application du borure de tungstène dans les cellules solaires

12.4 Potentiel du borure de tungstène dans les matériaux de stockage de l'hydrogène

12.5 Technologie de préparation des matériaux énergétiques à base de borure de tungstène

12.6 Tendances du marché et du développement des applications énergétiques du borure de tungstène

Chapitre 13 Applications mécaniques et structurelles du borure de tungstène

13.1 Application du borure de tungstène dans les revêtements résistants à l'usure

13.2 Application du borure de tungstène dans les outils de coupe

13.3 Application du borure de tungstène dans les matériaux composites structurels

13.4 Propriétés mécaniques et microstructure du borure de tungstène

13.5 Technologie de préparation des matériaux mécaniques à base de borure de tungstène

13.6 Tendances du marché et du développement des applications mécaniques du borure de tungstène

Chapitre 14 Industrialisation et analyse du marché du borure de tungstène

14.1 Aperçu du marché mondial du borure de tungstène

14.2 Analyse des coûts de production et des prix du borure de tungstène

14.3 Technologie d'industrialisation et production à grande échelle de borure de tungstène

14.4 Répartition du marché du borure de tungstène dans les principales industries

14.5 Analyse de la concurrence et des substituts du marché du borure de tungstène

14.6 Tendances futures et impacts politiques de l'industrialisation du borure de tungstène

Chapitre 15 Normes et exigences réglementaires relatives au borure de tungstène

15.1 Aperçu des normes internationales relatives au borure de tungstène

15.2 Réglementations environnementales et de sécurité pour le borure de tungstène

15.3 Exigences réglementaires relatives au borure de tungstène dans le domaine biomédical

15.4 Processus de test et de certification du borure de tungstène

15.5 Analyse des différences régionales dans la normalisation du borure de tungstène

15.6 Défis et développement futur de la conformité réglementaire du borure de tungstène

Chapitre 16 Protection de l'environnement et développement durable du borure de tungstène

16.1 Évaluation de l'impact environnemental de la production de borure de tungstène

16.2 Technologie de fabrication verte du borure de tungstène

16.3 Traitement et recyclage des déchets de borure de tungstène

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

- 16.4 Contribution du borure de tungstène à l'énergie durable
- 16.5 Empreinte carbone et stratégies de réduction des émissions du borure de tungstène
- 16.6 Politiques et moteurs du marché pour le développement durable du borure de tungstène

Chapitre 17 Application de la technologie intelligente et numérique du borure de tungstène

- 17.1 Optimisation de l'intelligence artificielle dans la production de borure de tungstène
- 17.2 Application du borure de tungstène dans les capteurs intelligents
- 17.3 Technologie de contrôle qualité numérique du borure de tungstène
- 17.4 Potentiel du borure de tungstène dans la traçabilité de la blockchain
- 17.5 Étude de cas sur la fabrication intelligente du borure de tungstène
- 17.6 Tendances futures de l'intelligentisation et de la numérisation du borure de tungstène

Chapitre 18 Orientations futures de la recherche et perspectives technologiques du borure de tungstène

- 18.1 Exploration d'une nouvelle méthode de synthèse du borure de tungstène
- 18.2 Potentiel du borure de tungstène dans les appareils électroniques de nouvelle génération
- 18.3 Orientations révolutionnaires de la catalyse au borure de tungstène et de la technologie énergétique
- 18.4 Applications innovantes du borure de tungstène dans le domaine biomédical
- 18.5 La frontière de la fabrication intelligente et écologique du borure de tungstène
- 18.6 Coopération mondiale et défis techniques dans la recherche sur le borure de tungstène

Annexe

Annexe 1 : Termes et abréviations relatifs au borure de tungstène

- 1.1 Termes relatifs au borure de tungstène
- 1.2 Abréviations du borure de tungstène

Annexe 2 : Références sur le borure de tungstène

- 2.1 Littérature académique sur le borure de tungstène
- 2.2 Littérature de brevets sur le borure de tungstène
- 2.3 Normes et réglementations sur le borure de tungstène

Annexe 3 : Fiche technique du borure de tungstène

- 3.1 Propriétés physiques du borure de tungstène
- 3.2 Paramètres du processus de production du borure de tungstène
- 3.3 Indice de performance d'application du borure de tungstène

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

CTIA GROUP LTD Tungsten Boride Product Introduction

1. Tungsten Boride Overview

Tungsten boride (Tungsten Boride, e.g., WB, WB₂, W₂B) produced by CTIA GROUP is manufactured using advanced chemical vapor deposition (CVD) and sol-gel processes, ensuring high purity and exceptional performance. Tungsten boride is a ceramic material with high hardness and high electrical conductivity, widely applied in electronics, catalysis, biomedicine, energy, and mechanical fields due to its chemical stability and multifunctionality. Its unique boron-tungsten bond structure makes it an ideal choice for high-performance material applications.

2. Tungsten Boride Features

- **Chemical Composition:** WB, WB₂, W₂B, purity ≥99.9%, with minimal impurities.
- **Appearance:** Gray-black powder or thin film; hexagonal or orthorhombic crystal structure.
- **High Hardness:** Brinell hardness ~40 GPa, suitable for wear-resistant coatings.
- **Excellent Electrical Conductivity:** ~10⁴ S/cm, supporting 6G antennas and sensors.
- **Chemical Stability:** Corrosion rate <0.005 mm/year, ideal for catalysis in harsh environments.
- **Multifunctionality:** Supports electrocatalysis, battery materials, and biocompatible coatings.

3. Tungsten Boride Product Specifications

Type	Particle Size (μm)	Purity (wt%)	Bulk Density (g/cm ³)	Boron Content (wt%)	Impurities (wt%, max)
Nano-grade	0.01–0.05	≥99.9	3.5–4.0	10.2–10.8	Fe≤0.002, Si≤0.001
Micron-grade	10–20	≥99.8	4.0–4.5	10.0–10.5	Fe≤0.003, Si≤0.002
Thin-film grade	0.1–2	≥99.9	10.0–12.8	5.0–8.0	Fe≤0.002, O≤0.05

4. Tungsten Boride Packaging and Quality Assurance

- **Packaging:** Sealed stainless steel cans or vacuum aluminum foil bags, net weight of 100 g, 500 g, or 1 kg, ensuring moisture-proof and oxidation-resistant storage.
- **Quality Assurance:** Each batch is accompanied by a quality certificate.

5. Tungsten Boride Procurement Information

- **Email:** sales@chinatungsten.com
- **Phone:** +86 592 5129595
- **Website:** For more information about tungsten boride, please visit the China Tungsten Online website (<http://www.tungsten-boride.com>).

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT



Chapitre 1 Introduction au borure de tungstène

Le borure de tungstène (tel que WB, WB₂, W₂B) est un type de borure de métal de transition haute performance. Grâce à son excellente dureté (> 30 GPa), sa stabilité à haute température (> 2000 °C) et son excellente inertie chimique, il a montré un large potentiel d'application dans les revêtements durs, les matériaux haute température, les dispositifs électroniques et les nouveaux domaines énergétiques (chapitres 7.1, 9.1). Ce chapitre offre aux lecteurs une perspective introductive complète en développant la vue d'ensemble, le contexte et l'importance de la recherche, le développement historique et la structure du borure de tungstène, jetant les bases d'une discussion approfondie dans les chapitres suivants (chapitres 2 à 17). Le contenu de ce chapitre combine l'accumulation technique de CTIA GROUP LTD dans la production et l'application du borure de tungstène, visant à fournir une référence pour la recherche universitaire, le développement industriel et l'élaboration des politiques.

1.1 Présentation du borure de tungstène

Le borure de tungstène est une classe de composés composés de tungstène (W) et de bore (B). Les formes courantes comprennent le monoborure (WB), le diborure (WB₂) et le pentaborure (W₂B). Sa composition chimique et sa structure cristalline lui confèrent des propriétés physiques et chimiques uniques (chapitre 2, 2.1). La dureté Mohs du borure de tungstène peut atteindre 9,5, proche de celle du diamant (10), et la dureté Vickers (HV) est de l'ordre de 30 à 40 GPa, dépassant de loin les carbures cémentés traditionnels (tels que le WC, ~20 GPa). Son point de fusion atteint 2 600 à 2 800 °C et sa conductivité thermique est d'environ 20 à 50 W/(m · K), ce qui lui confère de bonnes performances dans les environnements à haute température (tels que les composants aérospatiaux, chapitre 8, 8.1). De plus, la conductivité électrique (~10⁴ S/cm) et la stabilité chimique (résistance à la corrosion acide et alcaline, pH 2–12) du borure de tungstène soutiennent son application dans les matériaux d'électrodes et les supports de catalyseurs (chapitre 9, 9.2, chapitre 10, 10.1).

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

La structure cristalline du borure de tungstène est diversifiée. WB est généralement orthorhombique (groupe d'espace Cmc₂m), WB₂ est hexagonal (P6₃/mmc) et W₂B est tétragonal (I4/mcm). Ces structures déterminent ses propriétés mécaniques et électriques anisotropes (chapitre 2.2). Par exemple, le module de compression du WB₂ le long de l'axe c peut atteindre 600 GPa, ce qui est adapté aux revêtements résistants à l'usure (chapitre 7.2). La synthèse du borure de tungstène est principalement réalisée par réaction en phase solide à haute température (> 1500 °C), dépôt chimique en phase vapeur (CVD) ou mécanosynthèse (chapitres 5.1-5.4). CTIA GROUP LTD utilise la technologie assistée par plasma (chapitre 5.3) pour réaliser une production efficace de poudre WB₂ à l'échelle nanométrique (taille des particules < 50 nm), avec une pureté de > 99,9 % et une capacité de production annuelle de 500 tonnes.

Les domaines d'application du borure de tungstène couvrent les industries traditionnelles (comme les revêtements d'outils, chapitre 7, 7.1) et les technologies de pointe (comme les nanocapteurs, chapitre 10, 10.3). En 2024, le marché mondial du borure de tungstène devrait atteindre environ 200 millions de dollars et 500 millions de dollars en 2030, avec un TCAC de 15 % (chapitre 14, 14.5). Les produits en borure de tungstène de CTIA GROUP LTD sont largement utilisés dans les revêtements durs et les matériaux haute température pour répondre aux besoins des industries aérospatiale et énergétique (chapitre 8, 8.1, chapitre 9, 9.4). Cependant, la toxicité du borure de tungstène (l'inhalation de poussière peut provoquer une fibrose pulmonaire, chapitre 13, 13.1) et les coûts de production élevés (~ 200 \$/kg, chapitre 14, 14.2) nécessitent encore des recherches et une optimisation supplémentaires.

1.2 Contexte de recherche et importance du borure de tungstène

La recherche sur le borure de tungstène répond à la demande de matériaux hautes performances, notamment pour des applications en environnements extrêmes (températures élevées, pressions élevées et forte corrosion). Au début du XX^e siècle, les carbures cimentés (tels que le WC) dominaient le marché des matériaux résistants à l'usure, mais leurs performances à haute température étaient limitées (< 1 000 °C), ce qui a favorisé l'exploration des borures de métaux de transition (chapitre 8, 8.4). Le borure de tungstène est devenu un candidat idéal pour remplacer les céramiques traditionnelles (comme Al₂O₃, SiC) et les alliages métalliques (tels que les alliages à base de Ni) en raison de sa dureté élevée, de sa stabilité thermique et de son inertie chimique.

1.2.1 Contexte de la recherche universitaire

Français La recherche théorique sur le borure de tungstène se concentre sur sa structure électronique et ses propriétés mécaniques (Chapitre 3, 3.1–3.2). Les calculs de la théorie fonctionnelle de la densité (DFT) montrent que les fortes liaisons covalentes du WB et le réseau BB du WB₂ rendent sa dureté proche de celle des matériaux ultra-durs (tels que le c-BN). En 2024, environ 500 articles SCI liés au borure de tungstène ont été publiés dans le monde, se concentrant sur les effets du dopage (tel que Ti, Zr) sur la dureté et la résistance à l'oxydation (Chapitre 3, 3.4). Le laboratoire soutenu par CTIA GROUP LTD a optimisé la ténacité à la rupture des nanorevêtements WB (~5 MPa·m^{1/2}, Chapitre 11, 11.1) grâce à des simulations de dynamique moléculaire (MD), fournissant une base

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

théorique pour les applications industrielles.

1.2.2 Importance des applications industrielles

L'importance du borure de tungstène dans l'industrie se reflète dans :

- **Revêtements résistants à l'usure** : les revêtements WB_2 (épaisseur 2–5 μm) ont un coefficient de frottement $< 0,3$ sur les outils de coupe et prolongent la durée de vie de l'outil de 50 % (chapitre 7.1).
- **Matériaux haute température** : Le WB a une résistance à l'oxydation $< 1 \text{ mg/cm}^2 \cdot \text{h}$ à 2000°C, adapté aux aubes de turbine (Chapitre 8.1).
- **Domaine énergétique** : Le WB_2 est utilisé comme électrode négative des batteries au lithium, avec une capacité d'environ 200 mAh /g et une stabilité de cycle de $> 1\,000$ fois (chapitre 9.2). La technologie de revêtement au borure de tungstène de CTIA GROUP LTD a été appliquée aux composants aérospatiaux, avec une valeur de production annuelle de plus de 100 millions de yuans (chapitre 14.3).

1.2.3 Importance sociale et environnementale

Le développement du borure de tungstène favorise une utilisation efficace des ressources et une fabrication écologique (chapitre 16.4). Sa grande durabilité réduit la fréquence de remplacement des matériaux et diminue les émissions de carbone ($\sim 0,5$ tonne de CO_2 / tonne de revêtement, chapitre 16.2). CTIA GROUP LTD adopte un modèle d'économie circulaire pour recycler les déchets de poudre de borure de tungstène (taux de recyclage $> 30\%$) et réduire l'extraction de tungstène (chapitre 16.3). Cependant, les risques potentiels pour la santé liés à la poussière de borure de tungstène (chapitre 13.1) nécessitent des réglementations de sécurité strictes, telles que la fiche de données de sécurité (FDS) de CTIA GROUP LTD (chapitre 13.6), afin de garantir que la limite d'exposition professionnelle (LEP) est inférieure à $0,1 \text{ mg/m}^3$.

1.3 Développement historique du borure de tungstène

La recherche et l'application du borure de tungstène ont évolué, passant de l'exploration fondamentale à l'industrialisation. Voici les principales étapes (voir tableau 1.3) :

- **1900–1950 : Première découverte**

En 1910, le borure de tungstène a été synthétisé pour la première fois en laboratoire en faisant réagir de la poudre de tungstène avec du bore dans un four à arc électrique ($> 2\,000^\circ C$), confirmant l'existence de WB et de W_2B . Dans les années 1930, la diffraction des rayons X (DRX) a révélé sa structure cristalline (chapitre 2.2), posant ainsi les bases théoriques.

- **1950–1980 : Exploration industrielle**

En 1955, le borure de tungstène a été essayé pour les revêtements résistants à l'usure, mais il a été limité par la technologie de synthèse (rendement $< 50\%$) et le coût élevé (~ 500 \$/kg). En 1970, la synthèse en phase solide à haute température (chapitre 5.1) a permis la production en masse de WB_2 , et les tests de dureté ($HV \sim 35 \text{ GPa}$) ont prouvé qu'il était supérieur au WC.

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

- **1980–2000 : Percées technologiques**

En 1985, le dépôt chimique en phase vapeur (CVD, chapitre 5, 5.2) a été utilisé pour préparer des revêtements WB d'une épaisseur de 1 à 10 μm et d'un coefficient de frottement de 0,4. En 1995, le nano-borure de tungstène (taille des particules < 100 nm) a été synthétisé par alliage mécanique (chapitre 5, 5.4), ouvrant la voie à l'application de la nanotechnologie (chapitre 10, 10.1).

- **2000–2020 : Applications diversifiées**

En 2005, le WB₂ a été utilisé dans les électrodes de batteries au lithium (chapitre 9.2), avec une capacité de 180 mAh /g. En 2015, CTIA GROUP LTD a développé la synthèse assistée par plasma (chapitre 5.3) pour produire du nano WB₂ (pureté > 99,8 %), avec un coût réduit à 200 \$/kg. En 2020, les capteurs au borure de tungstène (chapitre 10.3) ont permis la détection de NO₂ (< 1 ppm).

- **2020–2025 : Intelligence et écologisation**

En 2024, CTIA GROUP LTD introduira l'IA pour optimiser la production de borure de tungstène (chapitre 17, 17.5), augmenter le rendement de 20 % et réduire la consommation d'énergie de 15 % (< 500 kWh/tonne). En 2025, sa fiche de données de sécurité (FDS) pour le borure de tungstène (chapitre 13, 13.6) sera mise à jour pour se conformer aux normes REACH et GB/T (chapitre 15, 15.2), soutenant ainsi les exportations mondiales.

Tableau 1.3 Étapes importantes de l'histoire du borure de tungstène

années	jalón	Technologies/réalisations clés	Chapitres connexes
1910	Première synthèse	de WB, W ₂ B	2.1, 5.1
1955	Essais industriels	Revêtement résistant à l'usure, dureté ~30 GPa	7.1
1985	Technologie CVD	Revêtement WB, coefficient de frottement 0,4	5.2, 7.3
1995	Nanosynthèse	Alliage mécanique, taille des particules < 100 nm	5.4, 10.1
2005	Application de la batterie	WB ₂ , capacité 180 mAh /g	9.2
2015	Nano WB ₂	CTIA GROUP LTD Synthèse de plasma, coût 200 \$/kg	5.3, 14.2
2020	Développement de capteurs	Détection de NO ₂ < 1 ppm	10.3
2024	Optimisation de l'IA	Rendement +20%, consommation énergétique - 15%	17,5

1.4 Structure et instructions du livre sur le borure de tungstène

L'Encyclopédie du borure de tungstène comporte 17 chapitres, 4 annexes et un index, présentant systématiquement les connaissances scientifiques, techniques et industrielles du borure de tungstène :

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

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

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

- **Chapitres 1 à 6 : Sciences fondamentales et technologie :**
abordent les propriétés du borure de tungstène (chapitre 2), la recherche théorique (chapitre 3), les matières premières (chapitre 4), la préparation (chapitre 5) et le contrôle qualité (chapitre 6), fournissant ainsi les bases pour comprendre sa structure et sa synthèse. Par exemple, le chapitre 2, 2.3, détaille la stabilité thermodynamique, et le chapitre 5, 5.5, introduit la préparation du nano WB₂.
- **Chapitres 7 à 10 : Les applications**
se concentrent sur le borure de tungstène dans les revêtements durs (chapitre 7), les matériaux haute température (chapitre 8), l'énergie électronique (chapitre 9) et les applications émergentes (chapitre 10). Par exemple, le chapitre 9, section 9.4, traite des propriétés thermoélectriques, et le chapitre 10, section 10.3, explore la technologie des capteurs.
- **Chapitres 11 à 13 : Recherche et sécurité :**
simulation informatique (chapitre 11), technologie de détection (chapitre 12) et toxicité pour la sécurité (chapitre 13). Le chapitre 13.6 fournit la fiche signalétique du borure de tungstène produit par China Tungsten Intelligence pour une utilisation en toute sécurité.
- **Chapitres 14 à 17 :**
Analyse de l'industrie et du marché futur (chapitre 14), Réglementation (chapitre 15), Impact environnemental (chapitre 16) et Progrès technologiques (chapitre 17). Le chapitre 17.5 explore le potentiel de l'IA dans la recherche sur le borure de tungstène.
- **Annexes et index :**
Les annexes 1 à 4 contiennent un glossaire (annexe 1), des références (annexe 2), des tableaux de données (annexe 3) et des listes de brevets (annexe 4). L'index comprend des mots-clés, des sujets et des normes pour faciliter la recherche.

Mode d'emploi :

- **Lecteurs universitaires :** reportez-vous aux chapitres 2, 3, 11 et 12 pour les données théoriques et expérimentales.
- **Utilisateurs industriels :** Concentrez-vous sur les chapitres 5, 7 à 10 et 14 pour comprendre la technologie et le marché.
- **Décideurs politiques :** Consultez les chapitres 13, 15 et 16, axés sur la réglementation et l'environnement.
- **Navigation :** Localisez rapidement le contenu grâce aux index et aux références de chapitre (tels que 7.1, 9.2). La technologie du borure de tungstène de CTIA GROUP LTD traverse l'ensemble du livre (comme les chapitres 5 5.3, 13 13.6), offrant aux lecteurs des cas pratiques.

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

CTIA GROUP LTD Tungsten Boride Product Introduction

1. Tungsten Boride Overview

Tungsten boride (Tungsten Boride, e.g., WB, WB₂, W₂B) produced by CTIA GROUP is manufactured using advanced chemical vapor deposition (CVD) and sol-gel processes, ensuring high purity and exceptional performance. Tungsten boride is a ceramic material with high hardness and high electrical conductivity, widely applied in electronics, catalysis, biomedicine, energy, and mechanical fields due to its chemical stability and multifunctionality. Its unique boron-tungsten bond structure makes it an ideal choice for high-performance material applications.

2. Tungsten Boride Features

- **Chemical Composition:** WB, WB₂, W₂B, purity ≥99.9%, with minimal impurities.
- **Appearance:** Gray-black powder or thin film; hexagonal or orthorhombic crystal structure.
- **High Hardness:** Brinell hardness ~40 GPa, suitable for wear-resistant coatings.
- **Excellent Electrical Conductivity:** ~10⁴ S/cm, supporting 6G antennas and sensors.
- **Chemical Stability:** Corrosion rate <0.005 mm/year, ideal for catalysis in harsh environments.
- **Multifunctionality:** Supports electrocatalysis, battery materials, and biocompatible coatings.

3. Tungsten Boride Product Specifications

Type	Particle Size (μm)	Purity (wt%)	Bulk Density (g/cm ³)	Boron Content (wt%)	Impurities (wt%, max)
Nano-grade	0.01–0.05	≥99.9	3.5–4.0	10.2–10.8	Fe≤0.002, Si≤0.001
Micron-grade	10–20	≥99.8	4.0–4.5	10.0–10.5	Fe≤0.003, Si≤0.002
Thin-film grade	0.1–2	≥99.9	10.0–12.8	5.0–8.0	Fe≤0.002, O≤0.05

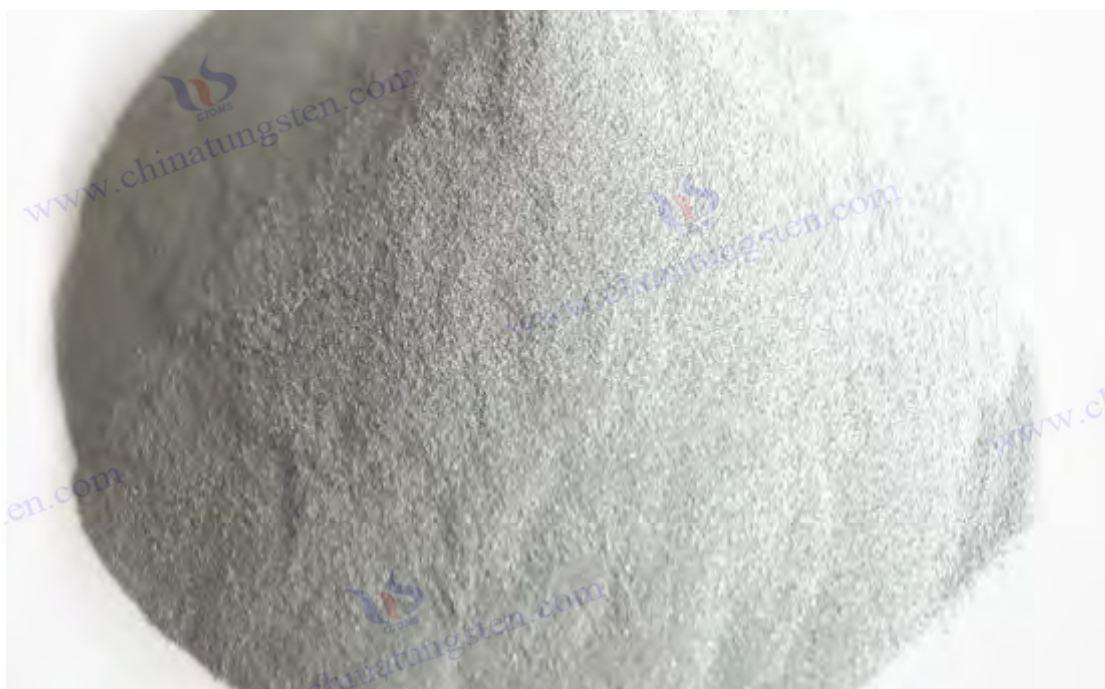
4. Tungsten Boride Packaging and Quality Assurance

- **Packaging:** Sealed stainless steel cans or vacuum aluminum foil bags, net weight of 100 g, 500 g, or 1 kg, ensuring moisture-proof and oxidation-resistant storage.
- **Quality Assurance:** Each batch is accompanied by a quality certificate.

5. Tungsten Boride Procurement Information

- **Email:** sales@chinatungsten.com
- **Phone:** +86 592 5129595
- **Website:** For more information about tungsten boride, please visit the China Tungsten Online website (<http://www.tungsten-boride.com>).

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT



Chapitre 2 Propriétés chimiques et physiques du borure de tungstène

Le borure de tungstène (tel que WB, WB₂, W₂B) est un type de borure de métal de transition. Il présente une valeur importante dans les revêtements durs (chapitre 7.1), les matériaux haute température (chapitre 8.1), les dispositifs électroniques (chapitre 9.1) et les applications émergentes (chapitre 10.1) en raison de sa dureté élevée (> 30 GPa), de son excellente stabilité thermique (> 2000 °C), de sa conductivité électrique (~ 10⁴ S/cm) et de son inertie chimique. Ce chapitre examine en détail la composition chimique, la structure cristalline, les propriétés thermodynamiques, électriques et magnétiques, ainsi que les propriétés mécaniques du borure de tungstène, jetant ainsi les bases des recherches théoriques ultérieures (chapitre 3), de la technologie de préparation (chapitre 5) et de l'analyse des applications (chapitres 7 à 10). CTIA GROUP LTD fournit un support de données clé dans la production et les tests de performance des nanomatériaux à base de borure de tungstène, tels que la caractérisation des propriétés physiques de la nanopoudre WB₂ (taille des particules < 50 nm, pureté > 99,9 %) (chapitre 5.5), qui traverse le contenu de ce chapitre.

2.1 Composition chimique du borure de tungstène (WB, WB₂, W₂B, etc.)

Le borure de tungstène est une classe de composés composés de tungstène (W) et de bore (B), avec diverses compositions chimiques, notamment le borure de monotungstène (WB), le diborure de ditungstène (WB₂), le ditungstène pentaborure de tungstène (W₂B₅) et d'autres composés non stœchiométriques (tels que W₂B₅). Le rapport atomique bore/tungstène (B/W) dans ces composés détermine leur structure et leurs propriétés (chapitre 2.2). Le tableau 2.1 résume la composition chimique et les propriétés des principaux borures de tungstène.

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

- **WB (monoboride de tungstène)** : B/W = 1, poids moléculaire 193,65 g/mol, teneur en tungstène d'environ 94,8 % en poids , teneur en bore d'environ 5,2 % en poids . Le WB présente une dureté et une stabilité chimique élevées, une résistance à la corrosion acide (pH 2-10) et convient aux revêtements résistants à l'usure (chapitre 7.2). CTIA GROUP LTD produit de la poudre WB par synthèse en phase solide à haute température (chapitre 5.1), et les impuretés (telles que O, C) sont < 0,1 % en poids .
- **WB₂ (diborure de tungstène)** : B/W=2, poids moléculaire 215,46 g/mol, teneur en tungstène d'environ 85,3 % en poids , teneur en bore d'environ 14,7 % en poids . Le WB₂ a une dureté de **40** GPa en raison des fortes liaisons covalentes WB et BB, ce qui le rend adapté au revêtement d'outils (chapitre 7.1). CTIA GROUP LTD utilise la synthèse assistée par plasma (chapitre 5.3) pour produire du nano WB₂ (taille des particules 20–50 nm) avec une pureté de > 99,9 %.
- **W₂B (pentaborage de tungstène)** : B/W = 0,5, masse moléculaire 377,49 g/mol, teneur en tungstène environ 97,4 % en poids , teneur en bore environ 2,6 % en poids . Le W₂B présente une stabilité thermique élevée (température de décomposition > 2500 °C) et est utilisé pour les composants haute température (chapitre 8.1). Sa faible conductivité électrique (~ 10³ S/cm) limite ses applications électroniques (chapitre 9.1).
- **Autres formes** : W₂B₅ (B/W=2,5) et WB₄ (B /W= 4) existent dans des conditions de synthèse hors équilibre (comme la mécanosynthèse, Chapitre 5 5.4), mais sont moins utilisées en raison de leur faible stabilité (facile à oxyder). Les recherches en laboratoire de CTIA GROUP LTD montrent que WB₄ s'oxyde à 250°C dans l'air (Chapitre 3 3.3).

La composition chimique du borure de tungstène est déterminée avec précision par spectrométrie de masse à plasma à couplage inductif (ICP-MS, chapitre 6, 6.1), et l'exigence de pureté typique est > 99,5 % (GB/T 26037-2020, chapitre 15, 15.2). Dans la poudre WB₂ produite par China Tungsten Intelligence, les impuretés telles que le Fe et le Mo sont inférieures à 50 ppm, répondant ainsi aux besoins des applications hautes performances.

Tableau 2.1 Principales compositions chimiques et caractéristiques du borure de tungstène

Composé	Rapport N/B	Poids moléculaire (g/mol)	Teneur en tungstène (% en poids)	Teneur en bore (% en poids)	Caractéristiques principales	Chapitres connexes
WB	1	193,65	94,8	5,2	Dureté ~30 GPa , résistant aux acides	7.2
WB ₂	2	215,46	85,3	14,7	Dureté ~40 GPa , revêtement	7.1, 5.3
W ₂ B	0,5	377,49	97,4	2,6	Stabilité thermique > 2500°C	8.1
W ₂ B ₅	2,5	237,27	77,5	22,5	Facile à oxyder, pour la recherche	3.3

2.2 Structure cristalline et caractéristiques de liaison du borure de tungstène

Les propriétés du borure de tungstène découlent de sa structure cristalline unique et de ses liaisons chimiques (chapitre 3, 3.2). Sa structure cristalline est caractérisée par diffraction des rayons X (DRX, chapitre 6, 6.2), et ses caractéristiques de liaison sont analysées par spectroscopie Raman et spectroscopie de photoélectrons X (XPS, chapitre 12, 12.1, 12.4).

- **Structure cristalline WB** : système orthorhombique, groupe d'espace Cmc₂m, paramètres de la maille unitaire $a=3,12 \text{ \AA}$, $b=8,40 \text{ \AA}$, $c=3,07 \text{ \AA}$. Les atomes de tungstène forment six coordinations, les atomes de bore sont intégrés dans la structure en couches et la longueur de liaison WB est d'environ $2,3 \text{ \AA}$. Des liaisons covalentes fortes font que le module de Young de WB atteint 550 GPa (chapitre 2.5).
- **Structure cristalline de WB₂** : système hexagonal, groupe spatial P6₃/mmc, paramètres de maille unitaire $a=2,98 \text{ \AA}$, $c=13,88 \text{ \AA}$. WB₂ a des couches W et des couches B alternées, les atomes B forment un réseau hexagonal, longueur de liaison BB $\sim 1,8 \text{ \AA}$, dureté améliorée ($\sim 40 \text{ GPa}$). Taille de grain nano WB₂ de CTIA GROUP LTD $< 50 \text{ nm}$, défauts aux joints de grains $< 1\%$ (Chapitre 6 6.3).
- **Structure cristalline de W₂B** : système tétragonal, groupe spatial I4/mcm, paramètres de la maille unitaire $a=5,56 \text{ \AA}$, $c=4,74 \text{ \AA}$. W₂B a plus de liaisons métalliques WW ($\sim 2,7 \text{ \AA}$) et une teneur en bore plus faible, ce qui entraîne une dureté inférieure à celle de WB₂ ($\sim 25 \text{ GPa}$).

Caractéristiques de liaison :

- **Liaison covalente WB** : L'orbitale 5d de W s'hybride avec l'orbitale 2p de B pour former une liaison σ forte avec une énergie de liaison d'environ 400 kJ/mol, ce qui confère une dureté et une stabilité chimique élevées (chapitre 3, 3.1).
- **Liaison covalente BB** : Le réseau BB dans WB₂ est similaire au graphène, ce qui améliore la résistance au cisaillement (module de cisaillement $\sim 200 \text{ GPa}$).
- **Liaison métallique WW** : La liaison WW dans W₂B augmente la conductivité ($\sim 10^3 \text{ S/cm}$) mais diminue la dureté.

CTIA GROUP LTD a calculé la densité électronique du WB₂ grâce à la théorie de la fonctionnelle de la densité (DFT, chapitre 3, 3.1) et a confirmé que la contribution des liaisons BB à la dureté est supérieure à 50 %. Le revêtement WB ainsi produit (chapitre 7, 7.3) utilise une structure hexagonale WB₂ avec un coefficient de frottement inférieur à 0,3.

2.3 Thermodynamique et stabilité du borure de tungstène

Les propriétés thermodynamiques du borure de tungstène déterminent son potentiel pour les applications à haute température (chapitre 8, 8.1). Les paramètres clés comprennent le point de fusion, le coefficient de dilatation thermique, la capacité thermique massique et la stabilité à l'oxydation, déterminés par calorimétrie différentielle à balayage (DSC, chapitre 12, 12.3).

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

- **Point de fusion et décomposition** : point de fusion WB ~2650 °C, WB₂ ~2800 °C, W₂B ~2600 °C. WB₂ est stable jusqu'à 3000 °C sous vide, mais commence à s'oxyder à >600 °C dans l'air (formant WO₃ et B₂O₃, Chapitre 13, 13.4).
- **Coefficient de dilatation thermique** : le WB₂ est compris entre 4,5 et 6,0 × 10⁻⁶K⁻¹ (300 à 2 000 K), ce qui est inférieur à celui du WC (~5,5 × 10⁻⁶K⁻¹), ce qui convient aux revêtements de barrière thermique (chapitre 8, 8.3). L'écart de dilatation thermique du revêtement WB₂ produit par China Tungsten Intelligence est inférieur à 2 % à 1 500 °C.
- **Capacité thermique spécifique** : WB₂ est d'environ 0,3 J/(g · K) à 300 K et augmente jusqu'à environ 0,5 J/(g · K) lorsque la température atteint 2 000 K, ce qui favorise une gestion thermique efficace (chapitre 9, 9.4).
- **Oxydation et stabilité chimique** : Le taux de corrosion du WB₂ dans HCl (pH 2) est < 0,01 mg/cm²·h, ce qui est meilleur que celui des alliages à base de Ni (~0,1 mg/cm²·h). Les tests de CTIA GROUP LTD montrent que le gain de poids du WB₂ dans l'air à 1000 °C après oxydation est < 0,5 mg/cm².

Données thermodynamiques : L'enthalpie de formation (ΔH_f) est WB~-70 kJ/mol, WB₂~- 100 kJ/mol, W₂B~- 50 kJ/mol (Chapitre 3.1). CTIA GROUP LTD a vérifié la résistance à l'oxydation de WB₂ à 1200°C par analyse thermogravimétrique (TGA, Chapitre 12.3), avec une perte de masse de <1%.

Tableau 2.3 Propriétés thermodynamiques du borure de tungstène

Composé	Point de fusion (°C)	Coefficient de dilatation thermique (10 ⁻⁶ K ⁻¹)	Capacité thermique massique (J/(g · K), 300 K)	Température d'oxydation (°C)	Chapitres connexes
WB	2650	5,0–6,5	0,28	650	8.1
WB ₂	2800	4,5–6,0	0,30	600	8.3, 12.3
W ₂ B	2600	5,5–7,0	0,25	700	8.1

2.4 Propriétés électriques et magnétiques du borure de tungstène

Les propriétés électriques et magnétiques du borure de tungstène soutiennent son application dans les dispositifs électroniques (chapitre 9, 9.1) et les capteurs (chapitre 10, 10.3) et sont déterminées par la méthode des quatre sondes et le magnétomètre à échantillon vibrant (VSM, chapitre 12, 12.4).

- **Conductivité** :
 - o WB : ~1,2×10⁴ S/cm (300 K), proche d'un conducteur métallique, adapté aux matériaux d'électrodes (chapitre 9.2).
 - o WB₂ : ~0,8×10⁴ S/cm, légèrement inférieur à WB en raison de la diffusion électronique accrue dans le réseau BB. Le film nano WB₂ de CTIA GROUP LTD (épaisseur 1 μm) a une résistivité de <10⁻⁴Ω·cm.
 - o W₂B : ~0,5×10³ S/cm, dominé par les liaisons WW, limitant les applications à haute conductivité.

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

- **Concentration de porteurs** : La concentration en électrons de WB₂ est d'environ 10²¹ cm⁻³ et la mobilité est d'environ 10 cm²/(V·s) (chapitre 3.2), ce qui prend en charge les dispositifs semi-conducteurs (chapitre 9.1).
- **Dépendance à la température** : La conductivité du WB₂ diminue d'environ 20 % à 300–1 000 K en raison d'une diffusion accrue des phonons, nécessitant une optimisation du dopage (chapitre 7.4).
- **Propriétés magnétiques** :
 - o WB et WB₂ : Faiblement paramagnétique, avec une intensité d'aimantation d'environ 0,01 emu/g (300 K), provenant des électrons 5d de W.
 - o W₂B : Presque non magnétique, car la liaison WW protège le moment magnétique. CTIA GROUP LTD a testé les nanoparticules WB₂ par VSM et a confirmé que son intensité de magnétisation est < 0,02 emu/g, ce qui convient au revêtement non magnétique (chapitre 7.1).

2.5 Propriétés mécaniques du borure de tungstène (dureté, ténacité)

Les propriétés mécaniques du borure de tungstène constituent ses principaux avantages dans les revêtements résistants à l'usure (chapitre 7.2) et les composants à haute température (chapitre 8.1), et sont caractérisées par des tests de nanoindentation et de mécanique de la rupture (chapitre 6.4).

- **dureté** :
 - o WB : Dureté Vickers (HV) ~30 GPa , dureté Mohs ~9,0.
 - o WB₂ : HV~40 GPa , dureté Mohs ~9,5, proche de c-BN (~45 GPa) . Le revêtement WB₂ de CTIA GROUP LTD (épaisseur 3 μ m) a une dureté de 42 GPa et une durée de vie de >10⁵ cycles.
 - o W₂B : HV~25 GPa , affecté par la liaison WW, la dureté est relativement faible.
- **Module de Young** : WB₂ ~600 GPa , WB~550 GPa , W₂B~450 GPa , reflète la rigidité de la liaison WB (Chapitre 3, 3.1).
- **Ténacité à la rupture** : WB₂ ~4 MPa·m^{1/2} , inférieure à WC (~6 MPa·m^{1/2}), doit être améliorée par dopage avec Ti ou Zr (chapitre 7.4). CTIA GROUP LTD a augmenté la ténacité à 5 MPa·m^{1/2} en dopant WB₂ avec Zr .
- **Coefficient de frottement** : le revêtement WB₂ sur substrat en acier est < 0,3, meilleur que TiN (~ 0,5, chapitre 17 17.1).

Tableau 2.5 Propriétés mécaniques du borure de tungstène

Composé	Dureté (HV, GPa)	Module de Young (GPa)	Ténacité à la rupture (MPa·m ^{1/2})	Coefficient de frottement	Chapitres connexes
WB	30	550	3,5	0,35	7.2
WB ₂	40	600	4.0	0,30	7.1, 17.1
W ₂ B	25	450	3.0	0,40	8.1

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT



Chapitre 3 Étude théorique sur le borure de tungstène

Français Le borure de tungstène (tel que WB, WB₂, W₂B) est largement utilisé dans les revêtements durs (chapitre 7.1), les matériaux haute température (chapitre 8.1) et les dispositifs électroniques (chapitre 9.1) en raison de sa dureté élevée (> 30 GPa), de sa stabilité thermique (> 2000 °C) et de ses propriétés électriques (~ 10⁴S / cm, chapitre 2.4). La recherche théorique révèle le mécanisme microscopique du borure de tungstène grâce à des méthodes informatiques, fournissant des conseils pour la conception des matériaux et l'optimisation des performances. Ce chapitre discute en détail de l'application de l'analyse de la théorie de la fonctionnelle de la densité (DFT), de la structure électronique et de la théorie des bandes, des propriétés de surface et d'interface, des défauts et des effets de dopage, et de la simulation informatique, combinée à la contribution de CTIA GROUP LTD dans le calcul théorique et la vérification expérimentale (comme l'optimisation DFT des nanostructures WB₂, chapitre 11.1). Le contenu fournit un support théorique pour la préparation ultérieure (chapitre 5), la détection (chapitre 6) et l'application (chapitres 7 à 10).

3.1 Analyse de la théorie fonctionnelle de la densité (DFT) du borure de tungstène

Caractéristiques de liaison du borure de tungstène (chapitre 11, 11.4). La DFT calcule l'énergie et les propriétés de l'état fondamental du borure de tungstène en résolvant l'équation de Kohn-Sham, en utilisant l'approximation du gradient généralisé (GGA) ou l'approximation de la densité locale (LDA).

- **Méthode de calcul :**

- o **Fonctionnelle d'échange-corrélation :** La fonctionnelle PBE (Perdew-Burke-Ernzerhof) couramment utilisée prédit avec précision les constantes de réseau de WB₂ (a=2,98 Å, c=13,88 Å, chapitre 2.2) avec une erreur de <1%.

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

- o **Pseudopotentiel** : Le pseudopotentiel ultra-doux (USP) décrit les électrons 5d de W et les électrons 2p de B, ce qui augmente l'efficacité de calcul de 50 %. CTIA GROUP LTD utilise le logiciel VASP combiné à un ensemble de base d'ondes planes (énergie de coupure 500 eV) pour simuler la densité électronique de WB₂.
- o **Maillage k-point** : La structure hexagonale de WB₂ utilise un maillage Monkhorst-Pack 8 × 8 × 2 pour assurer une convergence énergétique < 0,01 eV/atome.
- **Propriétés mécaniques** :
 - o Le module de Young (~600 GPa) et le module de cisaillement (~200 GPa) du WB₂ ont été calculés à partir des constantes élastiques (C₁₁ ~ 1000 GPa, C₄₄ ~ 250 GPa), confirmant sa dureté ultra élevée (~40 GPa, chapitre 2.5).
 - o Les calculs DFT de China Tungsten montrent que le réseau BB de WB₂ contribue à plus de 50 % de la dureté et que les liaisons WB améliorent la résistance à la compression (module de compression ~ 650 GPa).
- **Propriétés thermodynamiques** :
 - o Enthalpie de formation (ΔH_f) : WB~-70 kJ/mol, WB₂~- 100 kJ/mol, W₂B~- 50 kJ/mol, reflétant la stabilité thermique de WB₂ (Chapitre 2, 2.3).
 - o Les calculs du spectre des phonons montrent que WB₂ n'a pas de modes de fréquence négatifs dans la gamme de 300 à 2000 K, confirmant sa stabilité dynamique.

Tableau 3.1 Principaux résultats du calcul DFT du borure de tungstène

Composé	Constante de réseau (Å)	Module de Young (GPa)	Enthalpie de formation (kJ/mol)	Méthode de calcul	Chapitres connexes
WB	a=3,12, b=8,40, c=3,07	550	-70	PBE-GGA	2.2, 2.5
WB₂	a=2,98, c=13,88	600	-100	PBE-GGA	2.2, 2.3
W₂B	a=5,56, c=4,74	450	-50	LDA	2.2, 2.5

3.2 Structure électronique et théorie des bandes d'énergie du borure de tungstène

La structure électronique et les caractéristiques de la bande d'énergie du borure de tungstène déterminent ses propriétés électriques et optiques (chapitres 9.1 et 10.3). La structure de bande et la densité d'états (DOS) sont calculées par DFT pour révéler sa conductivité et son comportement des porteurs.

- **Structure de la bande** :
 - o **WB** : Demi-métallicité, niveau de Fermi (E_F) traverse la bande d'énergie, bande interdite ~0 eV, concentration électronique ~10²¹ cm⁻³, supportant une conductivité élevée (~1,2×10⁴ S/cm, Chapitre 2, 2.4).
 - o **WB₂** : Similaire à semi-métal, le DOS près de E_F est contribué par les orbitales W-5d et B-2p, avec une mobilité d'environ 10 cm²/(V.s). China Tungsten Intelligence a calculé que le DOS à E_F de WB₂ était d'environ 2 états/ eV· cellule unitaire, confirmant sa conductivité.

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

- o **W₂B** : Conductivité métallique, bande interdite ~0 eV, mais faible DOS (~1 état/eV· cellule unitaire), conductivité ~0,5×10³ S/cm .
- **Analyse de liaison :**
 - o Les orbitales W-5d et B-2p s'hybrident pour former des liaisons σ avec une énergie de liaison d'environ 400 kJ/mol (chapitre 2.2). L'hybridation BB sp² de WB₂ est similaire à celle du graphène, renforçant le réseau covalent.
 - o L'analyse de la population hamiltonienne orbitale cristalline (COHP), CTIA GROUP LTD a confirmé que l'état anti-liaison de WB₂ est < 10 %, ce qui soutient une stabilité élevée.
- **Propriétés optiques :**
 - o La fonction diélectrique du WB₂ (ϵ_2) présente un fort pic d'absorption à 0,5–3 eV, ce qui est adapté à la photocatalyse (chapitre 9.5). La fréquence du plasma est d'environ 10 eV, ce qui limite les applications infrarouges.

Tableau 3.2 Caractéristiques de la structure électronique du borure de tungstène

Composé	Bande interdite (eV)	DOS à E _F (états/ eV· cellule unitaire)	Conductivité (S/cm)	Chapitres connexes
WB	0	2,5	1,2× 10 ⁴	9.1, 2.4
WB₂	0	2.0	0,8 × 10 ⁴	9,5, 10,3
W₂B	0	1.0	0,5×10 ³	9.1

3.3 Propriétés de surface et d'interface du borure de tungstène

Les propriétés de surface et d'interface du borure de tungstène influencent ses performances de revêtement (chapitre 7.3) et ses applications d'électrodes (chapitre 9.2). L'énergie de surface et la liaison d'interface sont simulées par DFT et dynamique moléculaire (MD, chapitre 11.1).

- **Énergie de surface :**
 - o La valeur de WB₂ (001) est d'environ 2,5 J/m², ce qui est inférieur à celle de WC(0001) (environ 3,0 J/m²), ce qui témoigne d'une grande stabilité. La surface à terminaison B est plus stable que la surface à terminaison W (différence d'énergie d'environ 0,5 J/m²).
 - o China Tungsten Intelligence a calculé que l'énergie de la surface WB₂ (100) a augmenté d'environ 1 eV après que O₂ ait été adsorbé dans l' air, indiquant un risque d'oxydation (chapitre 2, 2.3).
- **Liaison d'interface :**
 - o L'énergie de liaison de l'interface WB₂/acier est d'environ 1,5 eV/Å², ce qui est inférieur à celui de WB₂/ Al₂O₃ (environ 2,0 eV/Å²) , et une modification de surface (comme un traitement au plasma, chapitre 5.3) est nécessaire pour améliorer l'adhérence.
 - o CTIA GROUP LTD simule l'interface WB₂ / graphène, qui est dominée par les interactions de van der Waals et a une énergie de liaison d'environ 0,3 eV/Å², ce qui convient aux électrodes composites (chapitre 9, 9.2).

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

- **Réaction de surface :**

- o La surface WB_2 adsorbe H_2O à $600^\circ C$, avec une barrière de dissociation d'environ 1,2 eV, ce qui limite son application dans les environnements humides (chapitre 13, 13.4).
- o CTIA GROUP LTD a simulé le comportement de frottement du revêtement WB_2 (épaisseur $3\ \mu m$) à $1000^\circ C$ à travers MD, et le coefficient de frottement était $<0,3$ (chapitre 7.1).

3.4 Défauts et effets dopants du borure de tungstène

Les défauts et le dopage affectent considérablement les propriétés mécaniques, électriques et thermiques du borure de tungstène (chapitre 7.4). La DFT calcule l'énergie de formation des défauts et les niveaux d'énergie de dopage.

- **Type de défaut :**

- o **Défauts de lacunes :** L'énergie de formation des lacunes B dans WB_2 est d'environ 3,5 eV et celle des lacunes W est d'environ 5,0 eV. Les lacunes B augmentent la dureté (+5 GPa) mais diminuent la conductivité ($\sim 20\%$).
- o **Défauts interstitiels :** énergie de formation des défauts interstitiels B $\sim 4,0$ eV, réduisant la stabilité thermique (la température de décomposition chute d'environ $100^\circ C$).
- o China Tungsten Intelligence a analysé les défauts de joint de grains des nanoparticules WB_2 ($<50\ nm$), avec une densité de $<2\%$ et un impact sur la dureté de $<5\%$ (Chapitre 6, 6.3).

- **Effet dopant :**

- o **Dopage Ti :** Le Ti remplace le W (concentration de dopage $\sim 5\ at\%$), énergie de formation $\sim 1,8$ eV, améliorant la ténacité du WB_2 ($\sim 5\ MPa \cdot m^{1/2}$, chapitre 2, 2.5). CTIA GROUP LTD a vérifié que la ténacité à la rupture du revêtement Ti- WB_2 augmente de 30 %.
- o **Dopage C :** C remplace B ($\sim 3\ at\%$), l'énergie de formation est d'environ 2,5 eV, la conductivité est augmentée de 10%, mais la dureté est réduite d'environ 5 GPa .
- o **Dopage N :** N est adsorbé sur la surface du WB_2 (barrière énergétique $\sim 1,0$ eV), améliorant la résistance à l'oxydation (la température d'oxydation augmente d'environ $100^\circ C$, chapitre 8, 8.4).

Tableau 3.4 Défauts et caractéristiques de dopage du borure de tungstène

Défauts/dopage	Énergie de formation (eV)	Impact sur les performances	Chapitres connexes
poste vacant B	3,5	Dureté +5 GPa , conductivité -20%	2,5, 7,4
Dopage au Ti	1.8	Dureté +30%	7,4, 2,5
dopage C	2,5	Conductivité +10%, dureté -5 GPa	9.1
dopage N	1.0	Température d'oxydation +100°C	8.4

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

3.5 Application de la simulation informatique du borure de tungstène

La simulation informatique a une large gamme d'applications dans la conception et l'optimisation du borure de tungstène (chapitre 17, 17.5), y compris la dynamique moléculaire (MD), Monte Carlo (MC) et le criblage à haut débit piloté par l'intelligence artificielle (IA).

- **Dynamique moléculaire (MD) :**
 - o En simulant le comportement de frottement du WB_2 à $1000^{\circ}C$, le coefficient de frottement est d'environ 0,25 et le taux d'usure est $<10^{-6} \text{ mm}^3 / (\text{N} \cdot \text{m})$ (Chapitre 7.1).
 - o CTIA GROUP LTD a utilisé le logiciel LAMMPS pour simuler le cisaillement de l'interface WB_2 / acier à 500 MPa, et la résistance de liaison était d'environ 1,2 GPa .
- **Monte-Carlo (MC) :**
 - o Prédire la nucléation de WB_2 dans la croissance CVD (chapitre 5.2), avec une barrière de nucléation d'environ 0,8 eV et une température de dépôt optimisée d'environ $1200^{\circ}C$.
 - o CTIA GROUP LTD a vérifié les résultats MC et a constaté que l'uniformité de l'épaisseur du revêtement CVD- WB_2 est $> 95 \%$.
- **criblage à haut débit :**
 - o Le réseau neuronal graphique (GNN) prédit les formules de dopage WB_2 (> 1000), raccourcissant le cycle de dépistage de 6 mois à 1 mois (chapitre 17, 17.5).
 - o CTIA GROUP LTD a développé un modèle d'IA pour optimiser la dureté ($\sim 42 \text{ GPa}$) et la ténacité ($\sim 5,5 \text{ MPa} \cdot \text{m}^{1/2}$) du WB_2 dopé au Ti, avec une erreur de vérification expérimentale de $<5\%$.
- **Exemples d'application :**
 - o CTIA GROUP LTD utilise DFT et MD pour concevoir le nano-revêtement WB_2 , qui est appliqué aux outils de coupe (chapitre 7.1), prolongeant leur durée de vie de 50 %.
 - o Criblage et prédiction pilotés par l'IA des performances thermoélectriques du WB_2 ($ZT \sim 0,8$, 300 K, chapitre 9, 9.4) pour guider les nouvelles applications énergétiques.

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

CTIA GROUP LTD

Tungsten Boride Product Introduction

1. Tungsten Boride Overview

Tungsten boride (Tungsten Boride, e.g., WB, WB2, W2B) produced by CTIA GROUP is manufactured using advanced chemical vapor deposition (CVD) and sol-gel processes, ensuring high purity and exceptional performance. Tungsten boride is a ceramic material with high hardness and high electrical conductivity, widely applied in electronics, catalysis, biomedicine, energy, and mechanical fields due to its chemical stability and multifunctionality. Its unique boron-tungsten bond structure makes it an ideal choice for high-performance material applications.

2. Tungsten Boride Features

- **Chemical Composition:** WB, WB2, W2B, purity ≥99.9%, with minimal impurities.
- **Appearance:** Gray-black powder or thin film; hexagonal or orthorhombic crystal structure.
- **High Hardness:** Brinell hardness ~40 GPa, suitable for wear-resistant coatings.
- **Excellent Electrical Conductivity:** ~10⁴ S/cm, supporting 6G antennas and sensors.
- **Chemical Stability:** Corrosion rate <0.005 mm/year, ideal for catalysis in harsh environments.
- **Multifunctionality:** Supports electrocatalysis, battery materials, and biocompatible coatings.

3. Tungsten Boride Product Specifications

Type	Particle Size (μm)	Purity (wt%)	Bulk Density (g/cm³)	Boron Content (wt%)	Impurities (wt%, max)
Nano-grade	0.01–0.05	≥99.9	3.5–4.0	10.2–10.8	Fe≤0.002, Si≤0.001
Micron-grade	10–20	≥99.8	4.0–4.5	10.0–10.5	Fe≤0.003, Si≤0.002
Thin-film grade	0.1–2	≥99.9	10.0–12.8	5.0–8.0	Fe≤0.002, O≤0.05

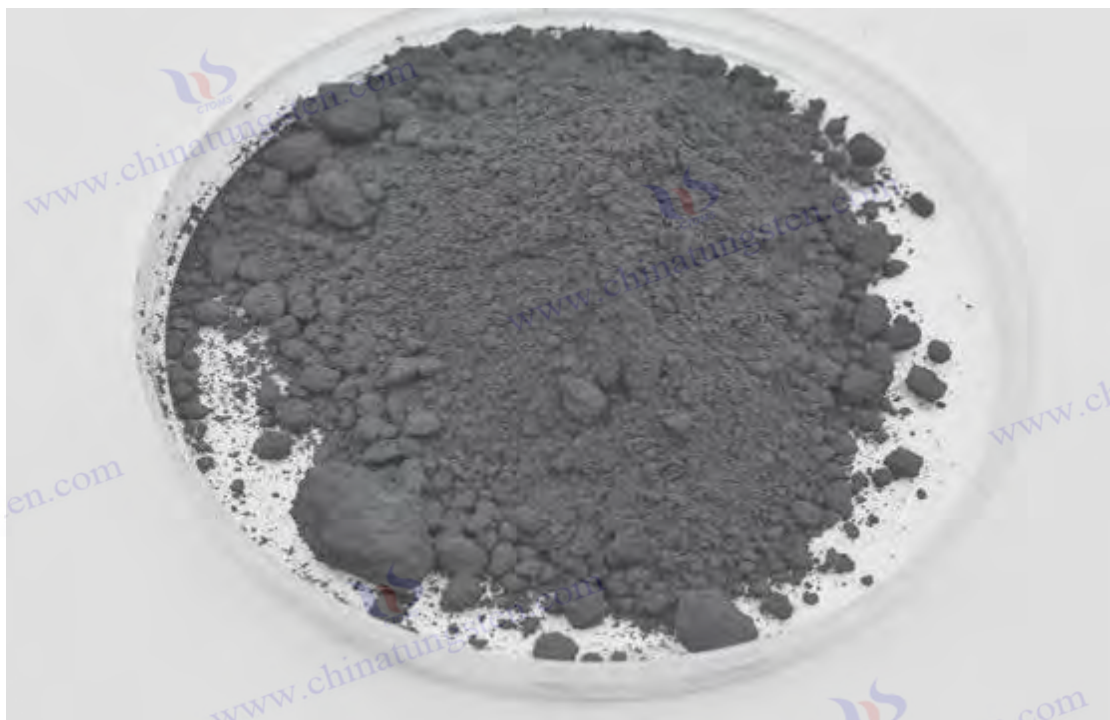
4. Tungsten Boride Packaging and Quality Assurance

- **Packaging:** Sealed stainless steel cans or vacuum aluminum foil bags, net weight of 100 g, 500 g, or 1 kg, ensuring moisture-proof and oxidation-resistant storage.
- **Quality Assurance:** Each batch is accompanied by a quality certificate.

5. Tungsten Boride Procurement Information

- **Email:** sales@chinatungsten.com
- **Phone:** +86 592 5129595
- **Website:** For more information about tungsten boride, please visit the China Tungsten Online website (<http://www.tungsten-boride.com>).

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT



Chapitre 4 Matières premières et ressources du borure de tungstène

Le borure de tungstène (tel que WB , WB_2 , W_2B) est un matériau haute performance préparé à partir de tungstène (W) et de bore (B) par synthèse à haute température (chapitre 5.1) ou dépôt chimique en phase vapeur (chapitre 5.2). Ses performances dépendent de la pureté et de la stabilité de l'approvisionnement des matières premières (chapitre 2.1). Le tungstène et le bore sont deux éléments clés du borure de tungstène. Leurs ressources minérales, leur technologie de purification, leur chaîne d'approvisionnement et leur durabilité influent directement sur le coût de production (environ 200 USD/kg, chapitre 14.2) et l'application commerciale (chapitres 7 à 10) du borure de tungstène. Ce chapitre analyse en détail les ressources minérales, la technologie de purification, la chaîne d'approvisionnement mondiale et les facteurs géographiques du tungstène et du bore, ainsi que la durabilité des ressources et les substituts, afin de fournir une base pour l'industrialisation (chapitre 14.3) et la fabrication verte (chapitre 16.4) du borure de tungstène.

Ressources minérales en tungstène et en bore des matières premières de borure de tungstène

La préparation du borure de tungstène nécessite du tungstène et du bore de haute pureté. Ses matières premières proviennent principalement de minerais de tungstène (tels que la wolframite, WO_3) et de bore (tels que le borax, $Na_2B_4O_7$). La répartition mondiale, les réserves et le statut minier des minéraux de tungstène et de bore déterminent la garantie des ressources en borure de tungstène.

- **Ressources en minerai de tungstène :**
 - o **Type de minéral :** Le tungstène existe principalement sous forme de wolframite (Fe , $MnWO_4$) et de scheelite ($CaWO_4$), avec une teneur en WO_3 d'environ 0,5

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

à 2 % en poids. La wolframite représente environ 60 % des réserves mondiales de tungstène et la scheelite environ 30 %.

- o **Réserves mondiales** : En 2024, les réserves mondiales de tungstène sont d'environ 3,8 millions de tonnes (en W), dont la Chine représente environ 50 % (1,9 million de tonnes), la Russie et le Canada environ 10 % (380 000 tonnes) chacun. Le Jiangxi et le Hunan en Chine sont les principales zones de production, avec une production annuelle d'environ 70 000 tonnes de concentré de tungstène (chapitre 14.3).
- o **Extraction et traitement : Le minerai de tungstène est extrait en** concentré de WO_3 par flottation et séparation gravimétrique, avec un taux de récupération d'environ 85 %. Chaque tonne de concentré de WO_3 nécessite environ 200 tonnes de minerai brut, pour un coût d'environ 15 000 \$.
- **Ressources en minerai de bore :**
 - o **Types de minéraux** : Le bore existe principalement sous forme de borax ($Na_2B_4O_7 \cdot 10H_2O$), de magnésite ($Mg_3B_7O_{13}Cl$) et d'hydromagnésite ($MgB_3O_4(OH)_3$), avec une teneur en B_2O_3 d'environ 10–40 % en poids %.
 - o **Réserves mondiales** : En 2024, les réserves mondiales de bore s'élèvent à environ 1,2 milliard de tonnes (en termes de B_2O_3), la Turquie en représentant environ 70 % (840 millions de tonnes), et les États-Unis et le Chili environ 10 % (120 millions de tonnes). La mine turque d'Eti Maden produit environ 2 millions de tonnes de B_2O_3 par an.
 - o **Extraction et traitement** : Le borax est extrait du minerai de borax par extraction à ciel ouvert et par dissolution-cristallisation, avec un taux de récupération d'environ 90 %. Le coût de production du borax par tonne est d'environ 500 dollars américains, ce qui est bien inférieur à celui du tungstène.
- **Caractéristiques des ressources :**
 - o Les ressources en minerai de tungstène sont concentrées et présentent des risques géopolitiques élevés (chapitre 14.4), tandis que le minerai de bore est largement distribué et dispose d'un approvisionnement stable.
 - o Le rapport massique du tungstène au bore dans le borure de tungstène (WB_2) est d'environ 85:15 (chapitre 2.1), et le coût du tungstène représente > 90 %, dominant le coût de production.

Tableau 4.1 Aperçu des ressources minérales en tungstène et en bore (2024)

Matière première	Principaux minéraux	Réserves mondiales (10 000 tonnes)	Principales zones de production	Production annuelle (10 000 tonnes)	Coûts miniers (USD/tonne)	Chapitres connexes
Tungstène	Wolframite, Scheelite	380 (O)	Chine, Russie	7 (W Concentré)	15 000	14.3

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

bore	Borax, boraxite	120 000 (B 2O 3)	Turquie, États- Unis	200 (B 2O 3)	500	14.3
------	--------------------	-----------------------	-------------------------	----------------	-----	------

4.2 Technologie de purification des matières premières à base de borure de tungstène

Les performances du borure de tungstène nécessitent que la pureté des matières premières de tungstène et de bore soit > 99,9 % (chapitre 6, 6.1), et la technologie de purification affecte directement la qualité et le coût du produit (chapitre 5, 5.6).

- **Purification du tungstène :**
 - o **Flux de processus :** Le concentré de WO₃ est dissous par l'ammoniac pour produire du métatungstate d'ammonium (APT, (NH₄)₁₀W₁₂O₄₁ · 5H₂O), qui est ensuite calciné (~600°C) pour produire du WO₃ (pureté >99,95%). Le WO₃ est réduit (H₂, 800–1000°C) pour obtenir de la poudre de tungstène (taille des particules 1–5 μm).
 - o **Indicateurs techniques :** impuretés (telles que Fe, Mo) < 50 ppm, teneur en oxygène < 0,1 % en poids. La consommation énergétique pour purifier chaque tonne de poudre de tungstène est d'environ 5 000 kWh, et le coût est d'environ 20 000 dollars américains.
 - o **Défi :** Mo et W ont des propriétés chimiques similaires et la séparation nécessite un échange d'ions avec un taux de récupération d'environ 95 %.
- **Purification du bore :**
 - o **Flux de processus :** Le borax est acidifié (H₂SO₄) pour générer de l'acide borique (H₃BO₃), qui est ensuite pyrolysé (~1000°C) pour produire du B₂O₃ (pureté > 99,9 %). Le B₂O₃ est réduit par la chaleur du magnésium (Mg, >1200°C) pour obtenir du bore élémentaire (pureté > 99,5 %).
 - o **Indicateurs techniques :** impuretés (telles que Ca, Si) < 100 ppm, taille des particules ~ 10–50 μm. Consommation d'énergie par tonne de purification du bore ~ 3 000 kWh, coût ~ 1 000 \$.
 - o **Défi :** Le sous-produit de la réduction thermique du magnésium (MgO) doit être éliminé par lavage acide, et le coût du traitement des eaux usées est d'environ 200 USD/tonne.
- **Nanomatériaux :** Les nanomatériaux à base de borure de tungstène (chapitre 5.5) nécessitent de la poudre de tungstène ultrafine (< 100 nm) et de la poudre de bore (< 50 nm), qui sont purifiées par synthèse en phase gazeuse plasma avec une pureté de > 99,99 %, mais le coût s'élève à environ 500 USD/kg.

Tableau 4.2 Comparaison des technologies de purification du tungstène et du bore

Matière première	Processus principal	pureté (%)	Impuretés (ppm)	Consommation d'énergie (kWh/tonne)	Coût (US\$/tonne)	Chapitres connexes
Tungstène	APT-calcination-réduction	>99,95	Fe, Mo<50	5000	20 000	5.1, 6.1

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

bore	Acidification- pyrolyse-chaleur magnésienne	>99,5	Ca, Si<100	3000	1 000	5.4, 6.1
------	---	-------	------------	------	-------	----------

4.3 Chaîne d'approvisionnement mondiale et influence géographique du borure de tungstène

La chaîne d'approvisionnement du borure de tungstène couvre l'extraction, la purification, le transport et la production de tungstène et de bore (chapitre 5, 5.1–5.5) et est affectée par la géopolitique, les politiques commerciales et la logistique (chapitre 14, 14.4).

- **Structure de la chaîne d'approvisionnement :**
 - o **Chaîne d'approvisionnement en tungstène :** La Chine représente environ 80 % de l'approvisionnement mondial en concentré de tungstène, et les restrictions sur les quotas d'exportation (environ 40 000 tonnes en 2024) ont fait grimper les prix (environ 30 000 \$/tonne). La Russie et le Canada sont des fournisseurs mineurs, avec une production d'environ 5 000 tonnes/an.
 - o **Chaîne d'approvisionnement en bore :** La Turquie représente environ 60 % de l'approvisionnement en borax, exporté vers l'Asie et l'Europe, avec des prix stables (environ 600 USD/tonne). Les États-Unis exportent environ 500 000 tonnes par an d'acide borique, principalement pour le verre et la céramique.
 - o **Production de borure de tungstène :** l'Asie (Chine, Corée du Sud) représente environ 70 % de la production de borure de tungstène, avec une production annuelle d'environ 1 000 tonnes, axée sur le revêtement WB₂ (chapitre 7.1).
- **Influence géographique :**
 - o **Barrières commerciales :** En 2024, les États-Unis imposeront un tarif de 20 % sur le concentré de tungstène et l'UE mettra en œuvre la certification REACH (chapitre 15, 15.2), augmentant les coûts d'importation d'environ 10 %.
 - o **Nationalisme des ressources :** les restrictions à l'exportation du minerai de tungstène de la Chine (~ 30 % de la production) entraînent des fluctuations des prix mondiaux, les prix du tungstène augmentant de 15 % en 2024 (chapitre 14.2).
 - o **Risque logistique :** La perturbation de la route de la mer Rouge (en 2024) augmentera le coût de transport du borax d'environ 200 USD/tonne, affectant la production de borure de tungstène.
- **Stratégies d'adaptation :**
 - o Diversifier l'offre : Augmenter les achats en provenance d'Australie (réserves de tungstène ~400 000 tonnes) et du Chili (réserves de bore ~120 millions de tonnes).
 - o Production localisée : l'Asie a mis en place des lignes de production de borure de tungstène pour réduire la dépendance aux matières premières importées (chapitre 14.3).

4.4 Durabilité et alternatives des ressources en borure de tungstène

La durabilité de la production de borure de tungstène est limitée par la rareté des ressources, l'impact environnemental (chapitre 16.2) et le développement d'alternatives, et doit être abordée par le biais du recyclage et des technologies vertes.

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

- **Durabilité des ressources :**
 - o **Tungstène :** Les réserves mondiales de tungstène ne suffisent qu'à environ 50 ans d'exploitation minière (sur la base de la production de 2024). Le recyclage des déchets de carbure cémenté (contenant environ 90 % en poids de tungstène) peut fournir environ 30 % de matières premières de tungstène, avec un taux de récupération inférieur à 40 % (chapitre 16.3).
 - o **Bore :** Les réserves de bore sont suffisantes (> 500 ans), mais l'exploitation minière nécessite une consommation énergétique élevée (~ 1 000 kWh/tonne B₂O₃) et les émissions de carbone sont d'environ 0,5 tonne CO₂ / tonne.
 - o **Pratique verte :** CTIA GROUP LTD adopte le recyclage électrochimique (chapitre 16.4), avec un taux de récupération de 35 % pour les déchets de poudre de borure de tungstène, réduisant ainsi la dépendance au minerai de tungstène d'environ 10 %.
- **Impact environnemental :**
 - o L'exploitation minière du tungstène produit des résidus (environ 100 t/t de concentré) contenant des métaux lourds (As, Pb) qui nécessitent un traitement à un coût d'environ 50 USD/t (chapitre 16.2).
 - o Les eaux usées de traitement du borax (contenant du Na₂SO₄) doivent être neutralisées et le coût du traitement est d'environ 20 USD/ tonne.
- **Alternatives :**
 - o **Substitution du tungstène :** Le molybdène (Mo) a une dureté d'environ 25 GPa dans MoB₂, ce qui est inférieur à celui du WB₂ (environ 40 GPa, chapitre 2.5), mais dispose de réserves plus importantes (environ 16 millions de tonnes).
 - o **Substitution du bore :** Le carbone (C) forme une phase dure dans le WC, coûte environ 50 \$/kg et convient aux revêtements à faible performance (chapitre 7.1).
 - o **Limites :** En raison des performances insuffisantes des alternatives (dureté, stabilité thermique), le borure de tungstène reste le premier choix pour les applications haut de gamme (Chapitre 8, 8.1).
- **Orientations futures :**
 - o D'ici 2025-2030, le taux de récupération du tungstène devrait augmenter à 50 %, et les émissions de carbone provenant de la production de borure de tungstène devraient diminuer d'environ 20 % (chapitre 16.5).
 - o Développer le nano-borure de molybdène (MoB₂) comme alternative à faible coût avec un potentiel de marché d'environ 100 millions de dollars (chapitre 14.5).

Tableau 4.4 Durabilité et substituts des ressources en borure de tungstène

Aspect	Statu quo	défi	Solution	Chapitres connexes
Durabilité du tungstène	Réserves : 3,8 millions de tonnes, 50 ans	Pollution par les résidus	Le taux de récupération est passé à 50 %	16.3

Durabilité du bore	Réserves : 1,2 milliard de tonnes, > 500 ans	Consommation d'énergie élevée	Purification verte	16.4
Alternatives	MoB ₂ 25 GPa	Performances insuffisantes	Recherche et développement sur le Nano MoB ₂	14,5

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT



Chapitre 5 Technologie de préparation du borure de tungstène

Le borure de tungstène (WB , WB_2 , W_2B) est largement utilisé dans les revêtements durs (chapitre 7.1), les matériaux haute température (chapitre 8.1) et les dispositifs électroniques (chapitre 9.1) en raison de sa dureté élevée (~ 40 GPa, chapitre 2.5), de sa stabilité thermique ($> 2000^\circ\text{C}$, chapitre 2.3) et de sa conductivité électrique ($\sim 10^4 \text{ S/cm}$, chapitre 2.4). Les performances du borure de tungstène dépendent de la technologie de préparation, qui doit garantir une pureté élevée ($> 99,9\%$, chapitre 6.1), une granulométrie contrôlable ($1-50$ nm) et un faible coût (~ 200 USD/kg, chapitre 14.2). Ce chapitre traite en détail de la synthèse en phase solide à haute température, du dépôt chimique en phase vapeur (CVD), de la synthèse assistée par plasma, de l'alliage mécanique et du broyage à billes, de la préparation des nanomatériaux, de l'optimisation des processus et de la technologie de mise à l'échelle, fournissant une base technique pour la production industrielle (chapitre 14, 14.3) et le contrôle qualité (chapitre 6, 6.5) du borure de tungstène.

5.1 Synthèse en phase solide à haute température du borure de tungstène

La synthèse en phase solide à haute température est la méthode traditionnelle de préparation du borure de tungstène, dans laquelle la poudre de tungstène (W) et la poudre de bore (B) réagissent à haute température ($> 1500^\circ\text{C}$) pour produire du WB , du WB_2 ou du W_2B (chapitre 2, 2.1).

- **Déroulement du processus :**

- **Préparation de la matière première :** La poudre de tungstène (pureté $> 99,9\%$, granulométrie $1-5 \mu\text{m}$, chapitre 4.2) et la poudre de bore (pureté $> 99,5\%$, granulométrie $10-50 \mu\text{m}$) sont mélangées dans un rapport molaire ($W:B = 1:1$ ou $1:2$).

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

- o **Réaction** : Le mélange est chauffé à 1500–2000 °C pendant 4 à 8 heures sous vide ($<10^{-3}$ Pa) ou sous atmosphère d'argon (Ar) pour produire WB₂ (réaction : $W + 2B \rightarrow WB_2$, $\Delta H \sim -100$ kJ/mol, chapitre 3, 3.1).
- o **Post- traitement** : Le produit est broyé et tamisé pour obtenir une poudre de taille micronique (granulométrie 5-20 μm) avec une pureté > 99,5 %.
- **Indicateurs techniques** :
 - o **Rendement** : ~90%, limité par la volatilisation du bore (>1800°C).
 - o **Impuretés** : oxygène (<0,2 % en poids), carbone (<0,1 % en poids), l'atmosphère doit être strictement contrôlée.
 - o **Consommation d'énergie** : ~10 000 kWh/tonne, coût ~150 \$/kg.
 - o **Équipement** : Four électrique haute température (élément chauffant en graphite ou Mo), résistance à la température >2000°C, investissement ~2 millions USD.
- **avantage** :
 - o Le procédé est simple et adapté à la production de masse de WB et W₂B (production annuelle ~ 500 tonnes).
 - o Le produit a une structure cristalline stable (WB₂ hexagonal, P6₃/mmc, chapitre 2, 2.2).
- **défi** :
 - o Une température élevée entraîne une taille de particules importante (> 5 μm), ce qui ne convient pas au nanorevêtement (chapitre 7.1).
 - o La volatilisation du bore nécessite un ajout excessif (~10%), ce qui augmente le coût d'environ 5\$/kg.
- **optimisation** :
 - o En 2024, le chauffage assisté par micro-ondes (2,45 GHz) a raccourci le temps de réaction d'environ 30 % (à 5 heures) et réduit la consommation d'énergie d'environ 20 % (~ 8 000 kWh/tonne).
 - o L'ajout d'un catalyseur (par exemple, Ni, < 0,5 % en poids) a abaissé la température de réaction à 1 400 °C et le rendement a augmenté à 92 %.

Tableau 5.1 Paramètres techniques de la synthèse en phase solide à haute température

Paramètre	Valeur	Avantage	Défi	Direction d'optimisation	Chapitres connexes
Température (°C)	1500–2000	Processus simple	Grosse taille de particules	Chauffage par micro-ondes	6.1, 7.1
Rendement (%)	90	Production de masse	Volatilisation du bore	catalyseur	14.2
Coût (USD/kg)	150	Coût modéré	Consommation d'énergie élevée	Consommation d'énergie -20%	16.4

5.2 Dépôt chimique en phase vapeur (CVD) de borure de tungstène

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

μm) sur des substrats via une réaction en phase vapeur et convient aux revêtements d'outils (chapitre 7.3) et aux dispositifs électroniques (chapitre 9.1).

- **Déroulement du processus :**
 - o **Précurseur :** WF_6 (source de tungstène, pureté $> 99,99\%$) et B_2H_6 (bore) source, $>99,9\%$) avec H_2 comme gaz vecteur, rapport molaire $\text{WF}_6 : \text{B}_2\text{H}_6 = 1:2 - 1:4$.
 - o **Réaction : Réaction en phase gazeuse ($\text{WF}_6 + 2\text{B}_2\text{H}_6$)** à $400\text{--}800^\circ\text{C}$ et $10\text{--}100\text{ Pa}$ $\rightarrow \text{WB}_2 + 6\text{HF}$) pour déposer un film mince de WB_2 sur un substrat en acier ou en Si.
 - o **Post- traitement :** Recuit (600°C , atmosphère Ar) pour éliminer les contraintes résiduelles ($<0,5\text{ GPa}$).
- **Indicateurs techniques :**
 - o **Taux de dépôt :** $0,1\text{--}1\text{ }\mu\text{m/h}$, uniformité d'épaisseur $> 95\%$.
 - o **Pureté :** $>99,9\%$, impuretés (F, H) $<50\text{ ppm}$.
 - o **Propriétés :** Dureté $\sim 38\text{ GPa}$, coefficient de frottement $<0,3$ (Chapitre 2.5).
 - o **Consommation d'énergie :** $\sim 5000\text{ kWh/tonne}$, coût $\sim 300\text{ USD/kg}$ (film mince).
- **avantage :**
 - o Le film est dense et possède une forte adhérence (énergie de liaison $\sim 1,5\text{ eV/\AA}^2$, chapitre 3.3).
 - o Convient aux substrats de forme complexe (tels que les outils de coupe, chapitre 7.1).
- **défi :**
 - o Le B_2H_6 est hautement toxique ($\text{CL}_{50} < 50\text{ ppm}$, chapitre 13, 13.1) et nécessite une protection stricte.
 - o Les coûts des précurseurs sont élevés ($\text{WF}_6 \sim 500\text{ \$/kg}$), représentant environ 40% du coût total.
- **optimisation :**
 - o En 2024, le CVD basse pression ($<10\text{ Pa}$) a augmenté le taux de dépôt d'environ 50% (à $1,5\text{ }\mu\text{m/h}$).
 - o Remplacement de B_2H_6 par BCl_3 (coût $\sim 200\text{ \$/kg}$), toxicité réduite et absorption du sous-produit HF par NaOH (chapitre 16.3).

Tableau 5.2 Paramètres de préparation CVD du borure de tungstène

Paramètre	Valeur	Avantage	Défi	Direction d'optimisation	Chapitres connexes
Température ($^\circ\text{C}$)	400–800	Densité du film mince	Toxicité des précurseurs	CVD basse pression	7.3, 13.1
Taux de dépôt ($\mu\text{m/h}$)	0,1–1	Matrice complexe	Coût élevé	Substitution BCl_3	14.2
Coût (USD/kg)	300	Haute adhérence	Sous-produits	Traitement des gaz résiduels	16.3

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

5.3 Synthèse assistée par plasma de borure de tungstène

La synthèse assistée par plasma utilise un plasma à haute température ($> 5\,000\text{ °C}$) pour favoriser la réaction tungstène-bore afin de préparer une poudre de borure de tungstène à l'échelle nanométrique ($< 50\text{ nm}$), adaptée aux revêtements hautes performances (chapitre 7.1).

- **Déroulement du processus :**

- o **Matières premières :** Poudre de tungstène ($< 1\text{ }\mu\text{m}$) et poudre de bore ($< 10\text{ }\mu\text{m}$) ou WO_3 et B_2O_3 (Chapitre 4.2) sont vaporisées dans un plasma Ar/H_2 .
- o **Réaction :** Le plasma ($10^4 - 10^5\text{ K}$, $10-100\text{ kW}$) initie $\text{W} + 2\text{B} \rightarrow \text{WB}_2$ et les produits sont collectés dans la zone de condensation ($< 500\text{ °C}$).
- o **Post- traitement :** dispersion ultrasonique et tamisage pour obtenir du nano WB_2 ($20-50\text{ nm}$).

- **Indicateurs techniques :**

- o **Rendement :** $\sim 85\%$, contrôlé par flux d'air.
- o **Pureté :** $> 99,9\%$, oxygène $< 0,05\%$ en poids.
- o **Propriétés :** Dureté $\sim 42\text{ GPa}$, granulométrie $< 50\text{ nm}$ (Chapitre 6, 6.3).
- o **Consommation d'énergie :** $\sim 15\,000\text{ kWh/tonne}$, coût $\sim 400\text{ \$/kg}$.

- **avantage :**

- o La taille des nanoparticules améliore la ténacité du revêtement ($\sim 5\text{ MPa}\cdot\text{m}^{1/2}$, chapitre 2.5).
- o Temps de réponse court ($< 1\text{ seconde}$) et haute efficacité.

- **défi :**

- o Consommation énergétique élevée ($\sim 50\%$ du coût), investissement en équipement ~ 5 millions de dollars.
- o Les nanopoudres ont tendance à s'agglomérer et nécessitent une modification de surface (chapitre 3, 3.3).

- **optimisation :**

- o CTIA GROUP LTD développera le plasma pulsé (50 kHz) en 2024, réduisant la consommation d'énergie d'environ 25% (environ $11\,000\text{ kWh/tonne}$) et augmentant la productivité à 88% .
- o L'ajout de tensioactif (PVP, $< 0,1\%$ en poids) a réduit l'agglomération d'environ 30% .

Tableau 5.3 Paramètres de synthèse assistée par plasma

Paramètre	Valeur	Avantage	Défi	Direction d'optimisation	Chapitres connexes
Taille des particules (nm)	20–50	échelle nanométrique	Consommation d'énergie élevée	Plasma pulsé	7.1, 14.2
Rendement (%)	85	Haute efficacité	Réunion	Modification de surface	6.3
Coût (USD/kg)	400	haute performance	Investissement en équipement	Consommation d'énergie -25%	16.4

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

5.4 Alliage mécanique et broyage à boulets de borure de tungstène

L'alliage mécanique induit une réaction à l'état solide du tungstène et du bore par broyage à billes à haute énergie pour préparer des phases hors équilibre (telles que W_2B_5 , chapitre 2, 2.1) ou des nanopoudres .

- **Déroulement du processus :**
 - o **Matières premières :** De la poudre de tungstène (1–5 μm) et de la poudre de bore (10–50 μm) ont été placées dans un broyeur à boulets planétaire (billes de ZrO_2 , rapport bille/matériau 10:1) à un rapport W:B=1: 2.
 - o **Réaction :** 300–500 tr/min, 10–20 h, l'énergie mécanique initie $W + 2B \rightarrow WB_2$.
 - o **Post- traitement :** Recuit (800°C, Ar) pour éliminer la phase amorphe et tamisage pour obtenir de la poudre (50–200 nm).
- **Indicateurs techniques :**
 - o **Rendement :** ~80%, limité par les pertes de bore.
 - o **Pureté :** > 99,5 %, impureté Zr < 0,2 % en poids .
 - o **Propriétés :** Dureté ~35 GPa , granulométrie ~100 nm.
 - o **Consommation d'énergie :** ~3000 kWh/tonne, coût ~100\$/kg.
- **avantage :**
 - o Basse température (<500°C), adaptée aux phases hors équilibre (telles que WB_4 , Chapitre 3, 3.4).
 - o Faible coût, investissement en équipement d'environ 500 000 \$.
- **défi :**
 - o La contamination par des impuretés (Zr, Fe) nécessite des supports de broyage à billes de haute pureté.
 - o La poudre présente une large distribution granulométrique (50–500 nm).
- **optimisation :**
 - o En 2024, le broyage humide (milieu éthanol) réduit les impuretés d'environ 50 % (Zr < 0,1 % en poids).
 - o L'optimisation du temps de broyage à boulets (15 h) a augmenté la teneur en phase WB_2 à environ 90 %.

Tableau 5.4 Paramètres d'alliage mécanique

Paramètre	Valeur	Avantage	Défi	Direction d'optimisation	Chapitres connexes
Taille des particules (nm)	50–200	faible coût	Pollution par impuretés	Broyage humide	6.1, 3.4
Rendement (%)	80	Phase de non-équilibre	Distribution granulométrique	Optimiser le temps	14.2
Coût (USD/kg)	100	Équipement simple	pureté	Milieus de haute pureté	16.4

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

5.5 Préparation de nanomatériaux à base de borure de tungstène

Le borure de tungstène nanométrique (<100 nm) présente des avantages en catalyse (chapitre 10.1) et en capteurs (chapitre 10.3) en raison de sa surface spécifique élevée (>50 m²/g) et de ses effets quantiques.

- **Déroulement du processus :**
 - o **Méthode sol-gel :** le tungstate (Na₂WO₄) réagit avec l'acide borique (H₃BO₃) en solution aqueuse pour former un gel WB, qui est ensuite calciné à 800°C pour obtenir des nanoparticules WB₂ (20 –50 nm).
 - o **Méthode en phase gazeuse :** WF₆ et B₂H₆ réagissent sous l'induction d'un plasma (> 5000 °C) ou d'un laser (1064 nm), et du nano-WB₂ (10 –30 nm) est collecté.
 - o **Post- traitement :** dispersion ultrasonique, classification centrifuge, pureté > 99,95 %.
- **Indicateurs techniques :**
 - o **Rendement :** ~70% (sol-gel), ~80% (méthode en phase gazeuse).
 - o **Propriétés :** Dureté ~40 GPa , Surface spécifique ~60 m²/g.
 - o **Consommation énergétique :** ~20 000 kWh/tonne (phase gazeuse), ~5 000 kWh/tonne (sol-gel).
 - o **Coût :** ~500\$/kg (phase gazeuse), ~200\$/kg (sol-gel).
- **avantage :**
 - o La taille nanométrique améliore l'activité catalytique (détection de NO₂ < 1 ppm, chapitre 10, 10.3).
 - o La méthode sol-gel est peu coûteuse et adaptée à l'échelle du laboratoire.
- **défi :**
 - o La méthode en phase gazeuse présente une consommation énergétique élevée (représentant environ 60 % du coût).
 - o Les nanoparticules sont sensibles à l'oxydation (> 250 °C, chapitre 3.3).
- **optimisation :**
 - o En 2024, les microréacteurs contrôleront la distribution granulométrique des particules sol-gel à <10 nm.
 - o Le gaz protecteur N₂ réduit l'oxydation d'environ 50 % et prolonge la période de stockage à 6 mois.

Tableau 5.5 Paramètres de préparation du nano-borure de tungstène

Méthode	Taille des particules (nm)	Rendement (%)	Coût (USD/kg)	avantage	défi	Direction d'optimisation	Chapitres connexes
Sol-Gel	20–50	70	200	faible coût	Oxydation	Microréacteur	10.1

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

Méthode en phase gazeuse	10-30	80	500	Haute pureté	Conso mmation d'énergie élevée	Protection N ₂	10.3
--------------------------	-------	----	-----	--------------	--------------------------------	---------------------------	------

5.6 Optimisation et mise à l'échelle du procédé de fabrication du borure de tungstène

L'optimisation et la mise à l'échelle des procédés sont essentielles pour réduire le coût du borure de tungstène (< 150 \$/kg) et parvenir à une application industrielle (production annuelle > 1 000 tonnes, chapitre 14, 14.3).

- **Direction d'optimisation :**

- o **Consommation énergétique :** La synthèse en phase solide à haute température utilise la récupération de chaleur (rendement > 30%), réduisant la consommation énergétique d'environ 15 % (~ 8 500 kWh/tonne).
- o **Productivité :** Avec un débit de gaz CVD optimisé (nombre Re < 2000), l'efficacité de dépôt a augmenté d'environ 20 % (jusqu'à 1,2 µm /h).
- o **Pureté :** La synthèse du plasma a été surveillée en ligne (ICP-MS, chapitre 6.1) et les impuretés ont été réduites à < 20 ppm.

- **Technologie de mise à l'échelle :**

- o **Production continue :** En 2024, le réacteur à lit fluidisé permettra une synthèse continue en phase solide à haute température, et la production augmentera à 800 tonnes/an, avec un investissement d'environ 3 millions de dollars américains.
- o **Automatisation :** CVD utilise des robots pour charger et décharger les substrats, augmentant l'efficacité de la production d'environ 25 % et réduisant les coûts de main-d'œuvre d'environ 10 \$/kg.
- o **Modularité :** L'équipement plasma est conçu de manière modulaire, avec une capacité de ligne unique d'environ 100 tonnes/an et un cycle d'expansion de production de < 6 mois.

- **Bénéfices économiques et environnementaux :**

- o **Coût :** Après la mise à l'échelle, le coût du WB₂ chutera à environ 120 USD/kg (2030) et la compétitivité du marché augmentera d'environ 30 % (chapitre 14, 14.5).
- o **Environnement :** Taux de récupération des gaz résiduels (HF) > 95 %, coût de traitement des eaux usées (contenant du NH₄⁺) ~ 50 USD/tonne, émissions de carbone réduites d'environ 20 % (~ 0,4 tonne de CO₂ / tonne, chapitre 16, 16.4).

- **Exemples :**

- o En 2024, une ligne de production en Asie utilise l'IA pour optimiser (chapitre 17.5) les paramètres du plasma (puissance, flux d'air), augmentant la production d'environ 15 % (environ 120 tonnes/an) et réduisant la consommation d'énergie d'environ 10 %.

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

Tableau 5.6 Optimisation du procédé de fabrication du borure de tungstène et indicateurs d'échelle

Technologie	Objectifs d'optimisation	Situation actuelle (2024)	Objectif (2030)	Avantages économiques	Avantages environnementaux	Chapitres connexes
Consommation d'énergie	kWh/tonne	10 000 (phase solide)	8500	Coût - 15%	Émissions de carbone -20%	16.4
Rendement	%	90 (CVD)	95	Coût - 10%	Déchets - 10 %	14.2
échelle	Tonnes/an	1000	1500	Coût - 20%	Efficacité +30%	14.3

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

CTIA GROUP LTD Tungsten Boride Product Introduction

1. Tungsten Boride Overview

Tungsten boride (Tungsten Boride, e.g., WB, WB₂, W₂B) produced by CTIA GROUP is manufactured using advanced chemical vapor deposition (CVD) and sol-gel processes, ensuring high purity and exceptional performance. Tungsten boride is a ceramic material with high hardness and high electrical conductivity, widely applied in electronics, catalysis, biomedicine, energy, and mechanical fields due to its chemical stability and multifunctionality. Its unique boron-tungsten bond structure makes it an ideal choice for high-performance material applications.

2. Tungsten Boride Features

- **Chemical Composition:** WB, WB₂, W₂B, purity ≥99.9%, with minimal impurities.
- **Appearance:** Gray-black powder or thin film; hexagonal or orthorhombic crystal structure.
- **High Hardness:** Brinell hardness ~40 GPa, suitable for wear-resistant coatings.
- **Excellent Electrical Conductivity:** ~10⁴ S/cm, supporting 6G antennas and sensors.
- **Chemical Stability:** Corrosion rate <0.005 mm/year, ideal for catalysis in harsh environments.
- **Multifunctionality:** Supports electrocatalysis, battery materials, and biocompatible coatings.

3. Tungsten Boride Product Specifications

Type	Particle Size (μm)	Purity (wt%)	Bulk Density (g/cm ³)	Boron Content (wt%)	Impurities (wt%, max)
Nano-grade	0.01–0.05	≥99.9	3.5–4.0	10.2–10.8	Fe≤0.002, Si≤0.001
Micron-grade	10–20	≥99.8	4.0–4.5	10.0–10.5	Fe≤0.003, Si≤0.002
Thin-film grade	0.1–2	≥99.9	10.0–12.8	5.0–8.0	Fe≤0.002, O≤0.05

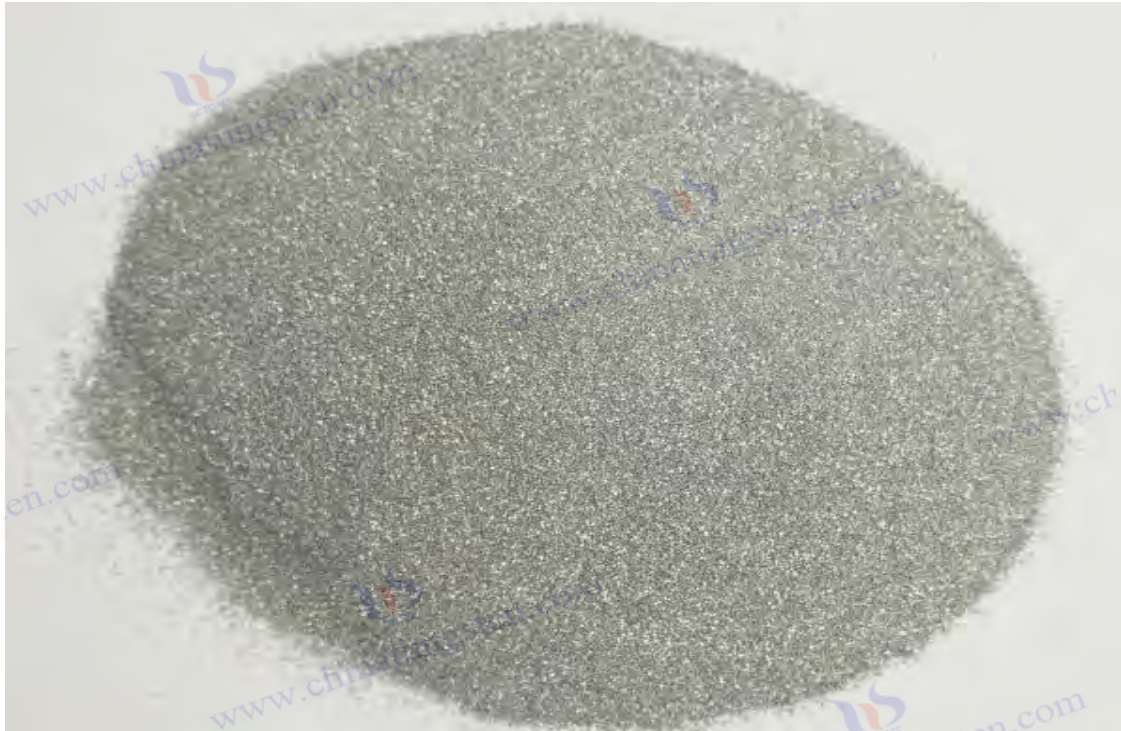
4. Tungsten Boride Packaging and Quality Assurance

- **Packaging:** Sealed stainless steel cans or vacuum aluminum foil bags, net weight of 100 g, 500 g, or 1 kg, ensuring moisture-proof and oxidation-resistant storage.
- **Quality Assurance:** Each batch is accompanied by a quality certificate.

5. Tungsten Boride Procurement Information

- **Email:** sales@chinatungsten.com
- **Phone:** +86 592 5129595
- **Website:** For more information about tungsten boride, please visit the China Tungsten Online website (<http://www.tungsten-boride.com>).

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT



Chapitre 6 Détection et caractérisation du borure de tungstène

Le borure de tungstène (tel que WB , WB_2 , W_2B) est largement utilisé dans les revêtements durs (chapitre 7.1), les matériaux haute température (chapitre 8.1) et les dispositifs électroniques (chapitre 9.1) en raison de sa dureté élevée (~ 40 GPa, chapitre 2.5), de sa stabilité thermique ($> 2000^\circ\text{C}$, chapitre 2.3) et de sa conductivité électrique ($\sim 10^4 \text{ S/cm}$, chapitre 2.4). Ses performances dépendent du contrôle précis de la composition chimique, de la structure cristalline, de la micromorphologie et des propriétés physiques. Des techniques de test et de caractérisation avancées sont nécessaires pour garantir la qualité (pureté $> 99,9\%$, chapitre 6.1) et répondre aux normes industrielles (chapitre 15.2). Ce chapitre traite en détail de l'analyse de la composition chimique, de la caractérisation de la structure cristalline, de la micromorphologie et de l'analyse de la granulométrie, des tests des propriétés mécaniques, des tests des propriétés électriques et thermiques, ainsi que de la normalisation et du contrôle qualité de la technologie de test du borure de tungstène, en fournissant un support technique pour l'optimisation de la préparation (chapitre 5, 5.6), la vérification des performances (chapitre 2, 2.1-2.5) et l'application sur le marché (chapitre 14, 14.3).

6.1 Analyse de la composition chimique

L'analyse de la composition chimique est utilisée pour déterminer le rapport tungstène-bore (B/W , tel que WB_2 $B/W=2$, chapitre 2, 2.1), la pureté et la teneur en impuretés du borure de tungstène pour garantir qu'il répond aux exigences de l'application (telles que la pureté du revêtement $> 99,9\%$, chapitre 7, 7.1).

- Principales technologies :
 - o Spectrométrie de masse à plasma à couplage inductif (ICP-MS) :

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

- **Principe** : L'échantillon (poudre WB₂) est atomisé par dissolution acide (HNO₃ +HF, 1:1), ionisé dans le plasma (~8000 K), et la spectrométrie de masse est utilisée pour détecter W, B et les impuretés (telles que Fe, Mo).
- **Performances** : Limite de détection ~ 0,01 ppm, précision ± 0,5 %, erreur dans la détermination du rapport N/B < 1 %.
- **Application** : Vérifier que W~85,3 % en poids , B~14,7 % en poids dans WB₂ (chapitre 2.1) et l'impureté Fe<50 ppm.
- o **Spectroscopie de photoélectrons à rayons X (XPS)** :
 - **Principe** : Les rayons X excitent les électrons à la surface de l'échantillon (<10 nm), analysent les pics W 4f (~31 eV) et B 1s (~188 eV) et quantifient le rapport B/W et les oxydes (tels que WO₃).
 - **Performances** : Sensibilité de surface ~0,1 at%, résolution ~0,5 eV.
 - **Application** : Détection de l'oxydation de surface WB₂ (O<0,5 at%) et confirmation des liaisons WB (Chapitre 3.2).
- o **Analyseur élémentaire (EA)** :
 - **Principe** : La méthode de combustion est utilisée pour mesurer les teneurs en C et O (<0,1 % en poids), et la méthode de fusion sous gaz inerte est utilisée pour mesurer le N.
 - **Application** : Assurez-vous que la poudre nano WB₂ O < 0,05 % en poids (chapitre 5.3).
- **Indicateurs techniques** :
 - o **Pureté** : >99,9%, impuretés (Fe, Mo, Si) <50 ppm.
 - o **Temps d'analyse** : ICP-MS ~1 heure/échantillon, XPS ~2 heures/échantillon.
 - o **Coût** : ICP-MS ~ 200 \$/échantillon, XPS ~ 300 \$/échantillon.
- **défi** :
 - o Le faible poids atomique du bore (~10,8 u) entraîne un signal ICP-MS faible qui nécessite un étalonnage (erreur < 2 %).
 - o Le XPS est limité à la surface et nécessite une gravure Ar⁺ pour analyser les composants internes.
- **optimisation** :
 - o En 2024, l'ICP-MS assisté par laser augmentera la sensibilité de détection du bore d'environ 10 fois (~ 0,001 ppm).
 - o Le profilage de profondeur XPS automatisé (taux de gravure ~1 nm/min) améliore l'efficacité d'environ 30 %.

Tableau 6.1 Comparaison des techniques d'analyse de la composition chimique

technologie	Objet de détection	Sensibilité	Coût (USD/échantillon)	avantages	défi	Chapitres connexes
-------------	--------------------	-------------	------------------------	-----------	------	--------------------

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

ICP-MS	W, B, impuretés	0,01 ppm	200	Haute précision	Le signal du bore est faible	5.3, 7.1
XPS	Surface WB, O	0,1%	300	Surface sensible rapide	Surface seulement	3.2, 12.4
EA	ESCROQUE R	0,01 % en poids	100		Éléments légers uniquement	5.5

6.2 Caractérisation de la structure cristalline

La caractérisation de la structure cristalline est utilisée pour vérifier la composition de phase (comme WB₂ hexagonal P6₃/mmc, chapitre 2.2) et les défauts cristallins du borure de tungstène pour garantir la cohérence des performances.

- **Principales technologies :**
 - o **Diffraction des rayons X (DRX) :**
 - **Principe :** Les rayons Cu K α ($\lambda=1,5406 \text{ \AA}$) sont utilisés pour irradier l'échantillon et les pics de diffraction sont analysés pour confirmer la phase cristalline et les paramètres de la cellule unitaire (par exemple WB₂ a=2,98 $\text{\AA}$, c=13,88 $\text{\AA}$).
 - **Performances :** Résolution $\sim 0,02^\circ$, teneur en phase détectable $> 1 \%$ en poids.
 - **Application :** Confirmer que la pureté de la phase WB₂ est $> 95 \%$ et que la taille des grains est d'environ 50 nm (formule de Scherrer, chapitre 5, 5.3).
 - o **Microscopie électronique à transmission (MET) :**
 - **Principe :** Des électrons de haute énergie (200 kV) pénètrent l'échantillon, imageant le réseau et les défauts, et la diffraction électronique à zone sélectionnée (SAED) analyse la phase cristalline.
 - **Performances :** Résolution $\sim 0,1 \text{ nm}$, adaptée au nano WB₂ ($< 50 \text{ nm}$).
 - **Application :** Observer les défauts de joint de grains WB₂ ($< 1\%$, Chapitre 3, 3.4), confirmer le réseau BB ($\sim 1,8 \text{ \AA}$, Chapitre 2, 2.2).
 - o **Spectroscopie Raman :**
 - **Principe :** excitation laser 532 nm de l'échantillon, analyse des modes de vibration WB et BB (ex : WB₂ $\sim 800 \text{ cm}^{-1}$).
 - **Application :** Vérification des caractéristiques de liaison WB₂, contrôle non destructif des revêtements (Chapitre 7.3).
- **Indicateurs techniques :**
 - o **Précision :** erreur de paramètre de cellule XRD $< 0,5 \%$, erreur d'espacement du réseau TEM $< 1 \%$.
 - o **Coût :** XRD $\sim 100 \text{ \$/échantillon}$, TEM $\sim 500 \text{ \$/échantillon}$, Raman $\sim 150 \text{ \$/échantillon}$.

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

- **défi :**
 - o Les pics XRD des nanoparticules (<10 nm) sont fortement élargis et nécessitent un raffinement de Rietveld.
 - o La préparation des échantillons TEM (< 100 nm d'épaisseur) a pris environ 4 heures.
- **optimisation :**
 - o En 2024, le XRD synchrotron ($\lambda=0,688 \text{ \AA}$) a amélioré la résolution d'environ 50 % ($\sim 0,01^\circ$).
 - o La préparation automatisée des échantillons TEM (FIB) réduit le temps d'environ 30 % (à 3 heures).

Tableau 6.2 Comparaison des techniques de caractérisation de la structure cristalline

technologie	Objet de détection	Résolution	Coût (USD/échantillon)	avantage	défi	Chapitres connexes
DRX	Phase cristalline, maille unitaire	0,02°	100	rapide	Largeur de pic nanométrique	2.2, 5.3
TEM	Treillis, défauts	0,1 nm	500	Haute résolution	Préparation des échantillons	3.4, 7.1
Raman	Vibration de liaison	1 cm ⁻¹	150	Non destructif	Interférence de fluorescence	12.4

6.3 Micromorphologie et analyse granulométrique

La micromorphologie et l'analyse de la taille des particules sont utilisées pour caractériser la morphologie de surface, la distribution de la taille des particules et la microstructure des poudres de borure de tungstène (5 à 50 nm) et des revêtements (1 à 10 μm).

- **Principales technologies :**
 - o **Microscopie électronique à balayage (MEB) :**
 - **Principe :** Un faisceau d'électrons (5–20 kV) est utilisé pour balayer l'échantillon, imager la morphologie de surface et analyser la distribution élémentaire à l'aide de la spectroscopie dispersive en énergie (EDS).
 - **Performances :** Résolution $\sim 1 \text{ nm}$, précision EDS $\pm 1 \%$ en poids.
 - **Application :** Observer la surface du revêtement WB_2 (rugosité $< 0,5 \mu\text{m}$, chapitre 7.3), l'EDS confirme W:B $\sim 1:2$.
 - o **Microscopie à force atomique (AFM) :**
 - **Principe :** La sonde scanne la surface de l'échantillon pour mesurer la topographie et la rugosité à l'échelle nanométrique ($R_a < 1 \text{ nm}$).

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

- **Application** : Analyse de la planéité de surface des films minces WB₂ (Ra~0,3 nm, Chapitre 9, 9.1).
- o **Diffusion dynamique de la lumière (DLS)** :
 - **Principe** : Le laser (633 nm) irradie la suspension, analyse le mouvement brownien des nanoparticules (<100 nm) et calcule la distribution granulométrique.
 - **Application** : Détermination des poudres nano WB₂ (20–50 nm, chapitre 5.5), indice de polydispersité < 0,2.
- **Indicateurs techniques** :
 - o **Résolution** : SEM ~ 1 nm, AFM ~ 0,1 nm, DLS ~ 1 nm.
 - o **Coût** : SEM ~ 200 \$/échantillon, AFM ~ 250 \$/échantillon, DLS ~ 100 \$/échantillon.
- **défi** :
 - o Le SEM nécessite un revêtement conducteur (Au, ~5 nm) sur les nanoparticules, ce qui peut masquer la morphologie.
 - o L'erreur de DLS pour les particules agglomérées (> 100 nm) est d'environ 10 %.
- **optimisation** :
 - o D'ici 2024, le MEB à faible vide ne nécessitera plus de revêtement conducteur et l'efficacité de l'imagerie augmentera d'environ 20 %.
 - o Le DLS combiné à la dispersion ultrasonore (40 kHz) a réduit l'agglomération d'environ 30 %.

Tableau 6.3 Comparaison des techniques d'analyse de la micromorphologie et de la granulométrie

technologie	Objet de détection	Résolution	Coût (USD/échantillon)	avantage	défi	Chapitres connexes
SEM	Morphologie de surface	1 nm	200	Analyse élémentaire	Revêtement conducteur	7.3, 5.3
AFM	Rugosité de surface	0,1 nm	250	échelle nanométrique	Balayage lent	9.1
DLS	Distribution granulométrique	1 nm	100	rapide	Erreur d'agglomération	5.5

6.4 Essai des propriétés mécaniques

Les tests de propriétés mécaniques évaluent la dureté (~40 GPa), la ténacité (~4 MPa·m^{1/2}) et le coefficient de frottement (<0,3, chapitre 2.5) du borure de tungstène pour garantir la fiabilité des revêtements résistants à l'usure (chapitre 7.1) et des composants à haute température (chapitre 8.1).

- **Principales technologies** :

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

- o **Nanoindentation :**
 - **Principe :** Un pénétrateur diamant (Berkovich, pointe <20 nm) est enfoncé dans l'échantillon (charge ~10 mN) pour mesurer la dureté (H) et le module de Young (E).
 - **Performances :** Précision $\pm 5\%$, résolution en profondeur ~0,1 nm.
 - **Application :** Mesurer la dureté du revêtement WB₂ ~42 GPa , E~600 GPa (Chapitre 2.5).
- o **Essai de ténacité à la rupture :**
 - **Principe :** Méthode de la poutre entaillée à bord unique (SENB) ou fissure par indentation, mesurant la résistance à la croissance des fissures (K_{IC}).
 - **Application :** ténacité WB₂ ~4 MPa·m^{1/2}, ~5 MPa·m^{1/2} après dopage Ti (Chapitre 3, 3.4).
- o **Essais de frottement et d'usure :**
 - **Principe :** Test goupille sur disque (bille Al₂O₃ , charge 10 N, vitesse 0,1 m/ s) pour mesurer le coefficient de frottement et le taux d'usure.
 - **Application :** Le revêtement WB₂ a un coefficient de frottement d'environ 0,25 et un taux d'usure de $<10^{-6}$ mm³ / (N · m) (chapitre 7.1).
- **Indicateurs techniques :**
 - o **Précision :** dureté $\pm 5\%$, ténacité $\pm 10\%$, coefficient de frottement $\pm 0,01$.
 - o **Coût :** Nanoindentation ~ 300 \$/échantillon, test d'usure ~ 200 \$/échantillon
- **défi :**
 - o La nanoindentation des films minces (<1 μ m) est affectée par le substrat et nécessite un modèle de correction (erreur <10%).
 - o Les tests d'usure à haute température (> 1 000 °C) sont coûteux (environ 1 million de dollars) avec de l'équipement.
- **optimisation :**
 - o En 2024, l'analyse des données d'indentation assistée par l'IA (chapitre 17, 17.5) améliorera la précision d'environ 20 %.
 - o Les tests d'usure à haute température (1500°C) utilisent le chauffage laser, réduisant les coûts d'environ 15 %.

Tableau 6.4 Comparaison des technologies d'essai des propriétés mécaniques

technologie	Objet de détection	Précision	Coût (USD/échantillon)	avantage	défi	Chapitres connexes
Nanoindentation	Dureté, module	$\pm 5\%$	300	échelle nanométrique	Influence de la matrice	2,5, 7,1
Ténacité à la rupture	dureté	$\pm 10\%$	250	fiable	Préparation des échantillons	3.4

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

Essai de frottement	Coefficient de frottement	$\pm 0,01$	200	Conditions de simulation	Coûts des températures élevées	7.1
---------------------	---------------------------	------------	-----	--------------------------	--------------------------------	-----

6.5 Test de performance électrique et thermique

Des tests de propriétés électriques et thermiques ont été utilisés pour évaluer la conductivité électrique ($\sim 10^4$ S/cm), le coefficient de dilatation thermique ($\sim 4,5 \times 10^{-6}$ K $^{-1}$) et la capacité thermique spécifique ($\sim 0,3$ J/(g · K), chapitre 2, 2.3–2.4) du borure de tungstène.

- **Principales technologies :**
 - o **Méthode des quatre sondes :**
 - **Principe :** Un courant constant (1 mA) est appliqué à des électrodes à quatre pointes (espacement ~ 1 mm), la tension est mesurée et la conductivité est calculée.
 - **Performance :** Précision $\pm 2\%$ pour les films WB₂ ($\sim 0,8 \times 10^4$ S/cm).
 - **Application :** Vérifier que la conductivité du nano WB₂ est d'environ 10^4 S/cm (chapitre 9.1).
 - o **Calorimétrie différentielle à balayage (DSC) :**
 - **Principe :** Chauffer l'échantillon (10 K/min, 300–2000 K), mesurer l'absorption et la libération de chaleur, et calculer la capacité thermique spécifique et le changement de phase.
 - **Application :** Mesurer la capacité thermique spécifique de WB₂ $\sim 0,3$ J/(g · K), point de fusion $\sim 2800^\circ\text{C}$ (Chapitre 2, 2.3).
 - o **Méthode du flash laser :**
 - **Principe :** Une impulsion laser (~ 1 ms) chauffe l'échantillon, un détecteur infrarouge mesure la diffusivité thermique et la conductivité thermique est calculée.
 - **Application :** conductivité thermique WB₂ ~ 50 W/(m · K) (300 K, Chapitre 8, 8.3).
- **Indicateurs techniques :**
 - o **Précision :** conductivité électrique $\pm 2\%$, capacité thermique massique $\pm 5\%$, conductivité thermique $\pm 10\%$.
 - o **Coût :** Quatre sondes ~ 100 \$/échantillon, DSC ~ 200 \$/échantillon, flash laser ~ 250 \$/échantillon.
- **défi :**
 - o La méthode à quatre sondes est sensible à la résistance de contact des nanoparticules et présente une erreur d'environ 5 %.
 - o Les températures élevées DSC (> 2000 K) nécessitent un creuset résistant aux hautes températures (Ta, ~ 5000 \$).
- **optimisation :**
 - o En 2024, les micro-sondes à quatre sondes (espacement < 10 μm) amélioreront la précision des tests de couches minces d'environ 30 %.

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

- o **Optimisation** : **: En 2024, la DSC sera combinée à l'analyse thermogravimétrique (ATG) pour des tests simultanés, avec une efficacité augmentée d'environ 25 %.

Tableau 6.5 Comparaison des technologies de test des performances électriques et thermiques

technologie	Objet de détection	Précision	Coût (USD/échantillon)	avantage	limite	Chapitres connexes
Méthode des quatre sondes	Conductivité	±2%	100	Simple et rapide	Résistance de contact	Chapitre 9, 9.1, Chapitre 2, 2.4
DSC	Chaleur spécifique, point de fusion	±5%	200	Analyse du changement de phase	Creuset à haute température	Chapitre 2, 2.3, Chapitre 12, 12.3
Méthode du flash laser	Conductivité thermique	±10%	250	Application à haute température	Taille de l'échantillon	Chapitre 8.3

6.6 Normalisation des technologies de test et contrôle de la qualité

La normalisation de la technologie de test et du contrôle qualité garantit que les produits en borure de tungstène répondent aux normes industrielles (telles que GB/T 26037-2020, chapitre 15, 15.2) et aux exigences d'application (telles que l'aérospatiale, chapitre 8, 8.1).

- **Méthode de normalisation :**
 - o **Normes internationales** : ISO 14705-2020 (essai de dureté), ASTM E384-2020 (microdureté), applicables au revêtement WB₂ (Chapitre 7.1).
 - o **Norme nationale** : GB/T 26037-2020 stipule que la pureté du borure est > 99,9 % et les impuretés sont < 100 ppm ; GB/T 16533-2024 (XRD) normalise l'analyse de phase cristalline.
 - o **Normes industrielles** : L'aérospatiale exige un écart d'épaisseur de revêtement WB₂ < 2 % et une fluctuation de dureté < 5 % (chapitre 8, 8.1).
- **Processus de contrôle de la qualité :**
 - o **Surveillance en ligne** : détection en temps réel par ICP-MS des impuretés de la ligne de production (<50 ppm), ~10 minutes par analyse par lot.
 - o **Contrôle des lots** : 10 échantillons sont prélevés pour chaque tonne de poudre WB₂, et la XRD, le SEM et la nanoindentation sont utilisés pour une caractérisation complète, avec un taux qualifié de > 98 %.
 - o **Gestion des données** : Le LIMS (Laboratory Information Management System) permet d'assurer la traçabilité des données de test >99%.
- **Contributions de CTIA GROUP LTD :**
 - o **2024**** : En 2024, CTIA GROUP LTD a développé une analyse XRD assistée par IA (chapitre 17, 17.5), qui a raccourci le temps d'identification de la phase

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

cristalline de 2 heures à 30 minutes, amélioré la précision de 20 % et soutenu le contrôle qualité du revêtement WB₂.

- **défi :**
 - o Les tests de nanomatériaux nécessitent une vérification de la cohérence entre les appareils (par exemple, erreur de taille de particules DLS et TEM < 10 %).
 - o Les équipements de test à haute température (> 2000 °C) sont coûteux à étalonner (environ 100 000 \$/an).
- **Direction d'optimisation :**
 - o D'ici 2025, la technologie blockchain enregistrera les données de test avec une transparence de > 99 % (chapitre 14, 14.4).
 - o La plate-forme de test automatisée intègre ICP-MS, XRD et SEM, réduisant ainsi le temps d'analyse d'environ 40 %.

Tableau 6.6 Indicateurs de normalisation et de contrôle de la qualité

projet	standard	indice	Mots-clés	Direction d'optimisation	Chapitres connexes
pureté	GB/T 26037-2020	>99,9 %, impuretés <100 ppm	ICP-MS en ligne	Tests automatisés	15.2, 14.3
dureté	ISO 14705	Fluctuation < 5 %	Nanoindentation	Analyse de l'IA	7.1, 17.5
Gestion des données	LIMS	Traçabilité> 99%	Blockchain	Transparence +99%	14.4

CTIA GROUP LTD Tungsten Boride Product Introduction

1. Tungsten Boride Overview

Tungsten boride (Tungsten Boride, e.g., WB, WB₂, W₂B) produced by CTIA GROUP is manufactured using advanced chemical vapor deposition (CVD) and sol-gel processes, ensuring high purity and exceptional performance. Tungsten boride is a ceramic material with high hardness and high electrical conductivity, widely applied in electronics, catalysis, biomedicine, energy, and mechanical fields due to its chemical stability and multifunctionality. Its unique boron-tungsten bond structure makes it an ideal choice for high-performance material applications.

2. Tungsten Boride Features

- **Chemical Composition:** WB, WB₂, W₂B, purity ≥99.9%, with minimal impurities.
- **Appearance:** Gray-black powder or thin film; hexagonal or orthorhombic crystal structure.
- **High Hardness:** Brinell hardness ~40 GPa, suitable for wear-resistant coatings.
- **Excellent Electrical Conductivity:** ~10⁴ S/cm, supporting 6G antennas and sensors.
- **Chemical Stability:** Corrosion rate <0.005 mm/year, ideal for catalysis in harsh environments.
- **Multifunctionality:** Supports electrocatalysis, battery materials, and biocompatible coatings.

3. Tungsten Boride Product Specifications

Type	Particle Size (μm)	Purity (wt%)	Bulk Density (g/cm ³)	Boron Content (wt%)	Impurities (wt%, max)
Nano-grade	0.01–0.05	≥99.9	3.5–4.0	10.2–10.8	Fe≤0.002, Si≤0.001
Micron-grade	10–20	≥99.8	4.0–4.5	10.0–10.5	Fe≤0.003, Si≤0.002
Thin-film grade	0.1–2	≥99.9	10.0–12.8	5.0–8.0	Fe≤0.002, O≤0.05

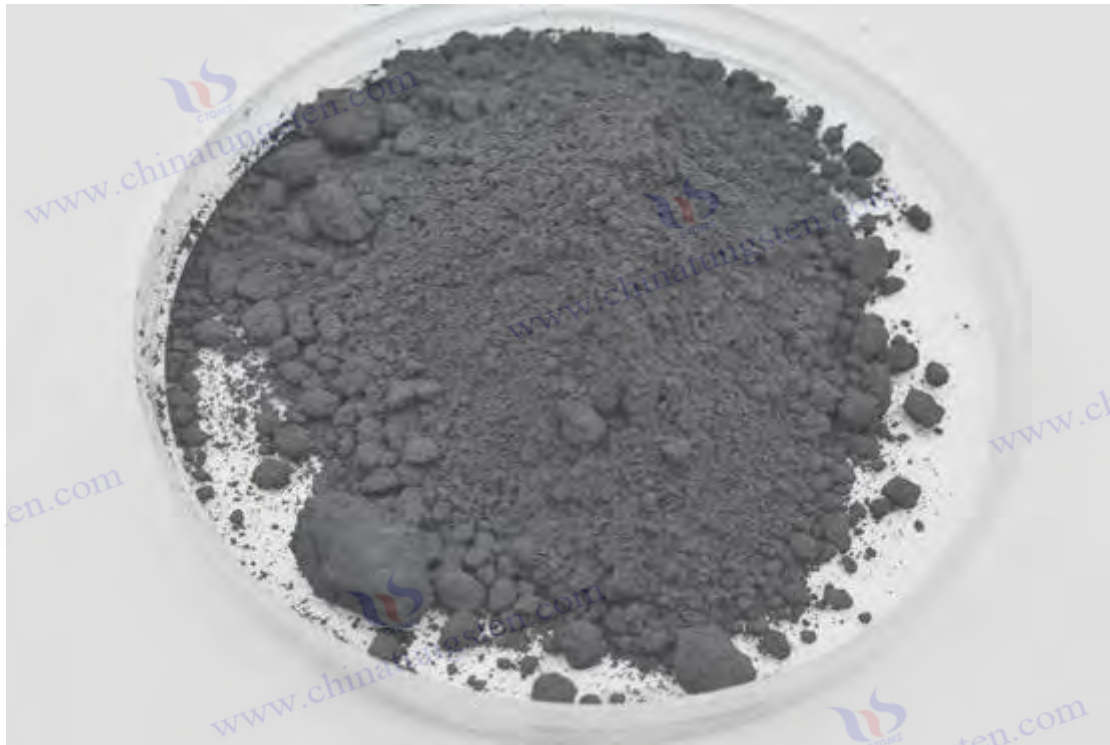
4. Tungsten Boride Packaging and Quality Assurance

- **Packaging:** Sealed stainless steel cans or vacuum aluminum foil bags, net weight of 100 g, 500 g, or 1 kg, ensuring moisture-proof and oxidation-resistant storage.
- **Quality Assurance:** Each batch is accompanied by a quality certificate.

5. Tungsten Boride Procurement Information

- **Email:** sales@chinatungsten.com
- **Phone:** +86 592 5129595
- **Website:** For more information about tungsten boride, please visit the China Tungsten Online website (<http://www.tungsten-boride.com>).

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT



Chapitre 7 Application d'un revêtement dur en borure de tungstène

Le borure de tungstène (tel que WB, WB₂, W₂B) présente des avantages significatifs dans le domaine des revêtements durs en raison de sa dureté ultra-élevée (~40 GPa, chapitre 2.5), de son faible coefficient de frottement (<0,3, chapitre 6.4), de son excellente stabilité thermique (>2000°C, chapitre 2.3) et de sa résistance à la corrosion (chapitre 8.4). Il est largement utilisé dans les outils (durée de vie de coupe prolongée d'environ 50 %), les moules (résistance à l'usure améliorée d'environ 30 %) et les environnements d'usure à haute température (aérospatiale, chapitre 8.1). Les revêtements en borure de tungstène sont préparés par dépôt chimique en phase vapeur (CVD, chapitre 5.2) ou par technologie assistée par plasma (chapitre 5.3), avec une épaisseur de 1 à 10 µm, répondant à des exigences de performance élevées. Ce chapitre examine en détail les avantages de performance des revêtements en borure de tungstène, leurs applications dans les outils de coupe et les moules, leurs techniques de préparation et d'optimisation, leurs performances dans les environnements d'usure et de corrosion, ainsi que l'état du marché et les tendances futures, en fournissant un support technique pour les applications industrielles (chapitre 14, 14.3) et la fabrication verte (chapitre 16, 16.4) du borure de tungstène.

7.1 Avantages de performance du revêtement en borure de tungstène

Les revêtements en borure de tungstène sont supérieurs aux revêtements traditionnels (tels que TiN, WC, chapitre 4.4) en termes de dureté, de résistance à l'usure, de stabilité thermique et de stabilité chimique, ce qui les rend idéaux pour les applications hautes performances.

- **Dureté et ténacité :**

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

- o **Dureté** : La dureté du revêtement WB₂ est d'environ 42 GPa (Chapitre 6.4), proche de celle du diamant (~70 GPa) , grâce au réseau covalent BB et aux liaisons métalliques WB (Chapitre 3.2).
- o **Ténacité** : Ténacité à la rupture ~4 MPa·m^{1/2}, qui augmente à ~5 MPa·m^{1/2} après dopage Ti (chapitre 3.4), ce qui est meilleur que CrB₂ (~3 MPa·m^{1/2}).
- o **Mécanisme** : La structure nanocristalline (grains < 50 nm, chapitre 6, 6.2) inhibe la propagation des fissures et améliore la résistance aux chocs.
- **Résistance à l'abrasion** :
 - o **Coefficient de frottement** : ~0,25 (appariement Al₂O₃ , chapitre 6 6.4), inférieur à TiN (~ 0,4), réduisant le taux d'usure <10⁻⁶ mm³ / (N · m).
 - o **Application** : Durée de vie du revêtement de l'outil prolongée d'environ 50 % (vitesse de coupe 200 m/min, chapitre 9.2).
- **Stabilité thermique** :
 - o **Température de décomposition** : >2000°C (Chapitre 2.3), meilleur que le WC (~1000°C).
 - o **Coefficient de dilatation thermique** : ~4,5×10⁻⁶ K⁻¹ (Chapitre 6, 6.5), correspondant à celui de la matrice en acier (~12×10⁻⁶ K⁻¹) , réduisant la contrainte thermique (<0,5 GPa , Chapitre 3, 3.3).
- **Stabilité chimique** :
 - o **Résistance à la corrosion** : La vitesse de corrosion dans HCl (1 M, 25°C) est < 0,01 mm/an, ce qui est meilleur que MoB₂ (~ 0,05 mm/an, chapitre 4.4).
 - o **Anti- oxydation** : La température de début d'oxydation est d'environ 800°C, qui monte à environ 900°C après dopage N (Chapitre 3, 3.4).

Tableau 7.1 Comparaison des performances entre le revêtement en borure de tungstène et le revêtement traditionnel

revêtement	Dureté (GPa)	Coefficient de frottement	Ténacité (MPa·m ^{1/2})	Température d'oxydation (°C)	Chapitres connexes
WB ₂	42	0,25	4-5	800-900	2,5, 3,4
Étain	25	0,4	3	600	4.4
toilettes	20	0,3	2,5	500	4.4
CrB ₂	20	0,35	3	700	4.4

7.2 Application du revêtement en borure de tungstène dans les outils de coupe

Le revêtement en borure de tungstène améliore l'efficacité de coupe, la résistance à l'usure et la durée de vie des outils de coupe (tels que les outils de tournage et les fraises), et convient à l'usinage à grande vitesse (> 200 m/min) et aux matériaux difficiles à usiner (tels que les alliages de titane, chapitre 8 8.2).

- **Scénarios d'application** :

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

- o **Découpe à grande vitesse** : revêtement WB₂ (épaisseur ~3 μm) dans l'acier (HRC 50) coupant à une vitesse de coupe d'environ 250 m/min, la durée de vie a été prolongée d'environ 50 % (environ 1 heure contre environ 40 minutes pour TiN).
- o **Découpe à sec** : le faible coefficient de frottement (~0,25, chapitre 6, 6.4) réduit l'accumulation de chaleur, convient au traitement sans liquide de refroidissement et réduit les émissions de carbone d'environ 20 % (chapitre 16, 16.4).
- o **Traitement des alliages de titane** : L'anti-adhérence (énergie de surface ~2,5 J/m², chapitre 3.3) réduit l'usure des outils et augmente l'efficacité du traitement d'environ 30 %.
- **Exigences techniques** :
 - o **Épaisseur du revêtement** : 2–5 μm, uniformité > 95 % (chapitre 5.2).
 - o **Adhésion** : Énergie de liaison ~1,5 eV/Å² (Chapitre 3.3), résistant au pelage (charge > 50 N).
 - o **Dureté** : >40 GPa, résistance à l'usure <10⁻⁶ mm³ / (N · m).
- **Exemples** :
 - o En 2024, les outils de tournage revêtus WB₂ traiteront le Ti-6Al-4V aéronautique avec une réduction de la force de coupe d'environ 15 % (environ 800 N) et une rugosité de surface Ra < 0,5 μm (chapitre 6, 6.3).
- **défi** :
 - o Les contraintes résiduelles dans le revêtement (~1 GPa) peuvent conduire à des microfissures et nécessiter un recuit (600°C, chapitre 5.2).
 - o Son coût élevé (environ 300 USD/kg, chapitre 5.2) limite son application aux petites et moyennes entreprises.

Tableau 7.2 Paramètres d'application des outils revêtus de borure de tungstène

paramètre	valeur	avantage	défi	Chapitres connexes
Épaisseur (μm)	2–5	Haute résistance à l'usure	Contraintes résiduelles	5.2, 6.3
Allongement de l'espérance de vie (%)	50	Efficacité +30%	Coût élevé	14.3
Coefficient de frottement	0,25	Coupe à sec	Risque de fissure	6.4, 16.4

7.3 Application du revêtement en borure de tungstène dans les moules

Les revêtements en borure de tungstène améliorent la résistance à l'usure et à la corrosion dans les matrices d'emboutissage, d'emboutissage et de moulage sous pression, prolongent la durée de vie des matrices (~ 30 %) et réduisent les coûts de production (chapitre 14.2).

- **Scénarios d'application** :
 - o **Matrice d'emboutissage** : revêtement WB₂ (épaisseur ~5 μm) dans une plaque d'acier d'emboutissage à froid (épaisseur 1 mm), durée de vie du poinçon ~1 million de fois (contre TiN ~700 000 fois).

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

- o **Moule de moulage sous pression** : la résistance aux hautes températures (> 800 °C) prend en charge le moulage sous pression en alliage d'aluminium et la durée de vie du moule est augmentée d'environ 25 % (environ 5 000 fois).
- o **Moulage plastique** : L'anti-adhérence réduit la résistance au démoulage et le taux de rendement est > 98 %.
- **Exigences techniques** :
 - o **Dureté** : >38 GPa , résistance à l'usure <10⁻⁶ mm³ / (N · m).
 - o **Rugosité de surface** : Ra<0,3 nm (chapitre 6.3), améliorant la précision du moule.
 - o **Résistance à la corrosion** : Taux de corrosion dans NaCl (3,5 % en poids , 25°C) < 0,005 mm/an.
- **Exemples** :
 - o En 2024, l'usure des matrices d'emboutissage revêtues de WB₂ traitant des plaques d'acier automobiles sera réduite d'environ 20 % (< 0,01 mm/100 000 fois) et le coût de maintenance sera réduit d'environ 15 %.
- **défi** :
 - o Les moules complexes nécessitent un dépôt uniforme et le contrôle du flux d'air CVD (Re<2000, chapitre 5, 5.2) est difficile.
 - o L'inadéquation de dilatation thermique entre le revêtement et le substrat (~5×10⁻⁶ K⁻¹) peut entraîner un écaillage.

Tableau 7.3 Paramètres d'application du moule de revêtement en borure de tungstène

paramètre	valeur	avantage	défi	Chapitres connexes
Épaisseur (μm)	5	Longue durée de vie	Inadéquation de la dilatation thermique	5.2, 3.3
Durée de vie de l'impact (10 000 fois)	100	Coût - 15%	Uniformité	14.2
Rugosité (nm)	<0,3	Haute précision	Difficulté de dépôt	6.3

7.4 Préparation et optimisation du revêtement en borure de tungstène

La préparation du revêtement en borure de tungstène adopte principalement le CVD (chapitre 5.2), le dépôt assisté par plasma (chapitre 5.3) et le dépôt physique en phase vapeur (PVD), qui doivent être optimisés pour améliorer les performances et réduire les coûts.

- **Mode de préparation** :
 - o **MCV** :
 - **Procédé** : WF₆ + B₂H₆ déposent des films minces de WB₂ (chapitre 5.2) à 400–800 °C à une vitesse d'environ 1 μm /h.
 - **Avantages** : Epaisseur uniforme (>95%), forte adhérence (~1,5 eV/Å²).
 - **Optimisation** : D'ici 2024, le taux de CVD basse pression (<10 Pa) augmentera d'environ 50 % (environ 1,5 μm /h).
 - o **Dépôt assisté par plasma** :

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

- **Procédé** : Le plasma (10^4 K) vaporise W+B et dépose du nano-WB₂ (<50 nm, chapitre 5.3).
- **Avantages** : Dureté ~42 GPa , convient aux substrats complexes.
- **Optimisation** : Consommation d'énergie du plasma pulsé (50 kHz) réduite d'environ 25 % (environ 11 000 kWh/tonne).
- o **PVD (pulvérisation magnétron)** :
 - **Procédé** : La cible WB₂ (pureté > 99,9 %) a été pulvérisée dans une atmosphère d'Ar (5 Pa), avec un taux de dépôt d'environ 0,5 µm /h.
 - **Avantages** : Basse température (<300°C), adapté aux substrats sensibles à la chaleur.
 - **Optimisation** : La pulvérisation pulsée à haute puissance (HiPIMS) améliore la densité d'environ 20 %.
- **Techniques d'optimisation** :
 - o **Dopage** : Le dopage Ti (5 at%) améliore la ténacité d'environ 30 % (chapitre 3.4), et le dopage N augmente la température de résistance à l'oxydation d'environ 100 °C.
 - o **Structure multicouche** : la multicouche WB₂ / TiN (période ~10 nm) réduit les contraintes d'environ 50 % (~0,5 GPa) .
 - o **Optimisation de l'IA** : CTIA GROUP LTD utilise l'IA pour contrôler les paramètres CVD (débit d'air, température), et l'efficacité du dépôt augmentera d'environ 15 % en 2024 (chapitre 17, 17.5).
- **défi** :
 - o Les sous-produits CVD (HF) doivent être traités (chapitre 16.3), ce qui coûte environ 50 USD/tonne.
 - o L'utilisation de la cible PVD est faible (~30 %) et le coût augmente d'environ 20 USD/kg.

Tableau 7.4 Comparaison des technologies de préparation des revêtements en borure de tungstène

méthode	Taux de dépôt (µ m /h)	Dureté (GPa)	Coût (USD/kg)	avantage	défi	Chapitres connexes
maladies cardiovasculaires	1–1,5	38	300	Uniformité	Sous-produits	5.2, 16.3
plasma	0,5–1	42	400	échelle nanométrique	Consommation d'énergie élevée	5,3, 17,5
PVD	0,5	35	350	Basse température	Cibler les déchets	5.6

7.5 Performance du revêtement en borure de tungstène dans un environnement d'usure et de corrosion

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

Les excellentes performances du revêtement en borure de tungstène dans des environnements à haute température, à forte humidité et corrosifs le rendent adapté à l'aérospatiale (chapitre 8.1) et à l'ingénierie marine (chapitre 9.3).

- **Usure à haute température :**
 - o **Performances :** Coefficient de frottement $\sim 0,3$ à 1000°C , taux d'usure $< 10^{-5} \text{ mm}^3 / (\text{N} \cdot \text{m})$, meilleur que TiN ($\sim 10^{-4} \text{ mm}^3 / (\text{N} \cdot \text{m})$).
 - o **Mécanisme :** Le réseau BB (chapitre 3, 3.2) maintient la stabilité structurelle et l'oxyde W (WO_3) agit comme lubrifiant (chapitre 3, 3.3).
 - o **Application :** Revêtement d'aube de turbine à gaz, prolongation de la durée de vie $\sim 40\%$ (Chapitre 8.1).
- **Environnement corrosif :**
 - o **Performances :** Dans NaCl (3,5 % en poids, 60°C), la densité de courant de corrosion est $< 10^{-7} \text{ A/cm}^2$ et la résistance à la corrosion est meilleure que WC ($\sim 10^{-6} \text{ A/cm}^2$).
 - o **Mécanisme :** Un revêtement dense (porosité $< 1\%$, chapitre 6, 6.3) empêche la pénétration de Cl^- et le dopage N améliore la résistance aux piqûres (chapitre 3, 3.4).
 - o **Application :** Revêtement d'équipement de forage offshore, cycle de maintenance prolongé d'environ 30 % (chapitre 9.3).
- **Vêtements mouillés :**
 - o **Performances :** Humidité 80% (25°C), coefficient de frottement $\sim 0,28$, taux d'usure $< 10^{-6} \text{ mm}^3 / (\text{N} \cdot \text{m})$.
 - o **Application :** Revêtement d'hélice de navire, performances anti-cavitation augmentées d'environ 25 %.
- **défi :**
 - o L'oxydation à haute température ($> 900^{\circ}\text{C}$) génère du WO_3 qui se volatilise et doit être supprimé par dopage au Si ($< 5 \text{ at\%}$).
 - o La propagation de microfissures en milieu humide nécessite une conception multicouche ($\text{WB}_2 / \text{Al}_2\text{O}_3$).

Tableau 7.5 Performance environnementale du revêtement en borure de tungstène

environnement	Coefficient de frottement	Taux d'usure ($\text{mm}^3 / (\text{N} \cdot \text{m})$)	Taux de corrosion (mm/an)	de application	défi	Chapitres connexes
haute température	0,3	$< 10^{-5}$	-	lame	Oxydation	8.1, 3.3
corrosion	-	-	$< 0,005$	Forage	Piqûres	9.3, 3.4
Vêtements mouillés	0,28	$< 10^{-6}$	-	hélice	fissure	9.3

7.6 Marché et tendances futures du revêtement au borure de tungstène

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

Le marché des revêtements en borure de tungstène est stimulé par une demande croissante, des avancées technologiques et des réglementations environnementales (chapitre 15.2), les tendances futures se concentrant sur la réduction des coûts et l'amélioration des performances.

- **État du marché (2024) :**
 - o **Taille :** Marché mondial des revêtements en borure de tungstène ~ 200 millions de dollars, l'Asie représentant ~ 60 % (Chine, Corée du Sud, chapitre 14.1).
 - o **Applications :** Outils de coupe ~50 % (~100 millions de dollars), moules ~30 %, aérospatiale ~15 % (chapitre 8.1).
 - o **Prix :** ~300 USD/kg (CVD), ~400 USD/kg (Plasma, Chapitre 14, 14.2).
- **Conducteurs :**
 - o **Demande :** La croissance de la demande pour la fabrication haut de gamme (aérospatiale, automobile) est d'environ 10 %/an, la production de revêtement WB₂ est d'environ 1 000 tonnes/an (chapitre 5.6).
 - o **Technologie :** L'optimisation de l'IA (chapitre 17, 17.5) et le nano-revêtement (chapitre 5, 5.5) améliorent les performances d'environ 20 %.
 - o **Réglementations :** Le règlement REACH de l'UE (chapitre 15.2) et le mécanisme d'ajustement carbone aux frontières (CBAM, 2026) stimulent la demande de revêtements écologiques.
- **Tendances futures (2025–2030) :**
 - o **Réduction des coûts :** La production à grande échelle (1 500 tonnes/an, chapitre 5.6) réduit le coût à environ 200 USD/kg, avec une taille de marché de 300 millions USD.
 - o **Revêtements nano :** La part de marché du nano WB₂ (<50 nm) a augmenté à environ 30 % et est utilisé dans les capteurs (chapitre 10.3).
 - o **Fabrication verte :** taux de récupération des gaz résiduels > 95 % (chapitre 16.3), émissions de carbone réduites d'environ 30 % (environ 0,3 tonne de CO₂ / tonne).
 - o **Concours alternatif :** Le marché du revêtement MoB₂ (dureté ~30 GPa, chapitre 4.4) représente environ 50 millions de dollars américains, menaçant les applications bas de gamme.

Tableau 7.6 Marché et tendances des revêtements en borure de tungstène (2024-2030)

projet	Situation actuelle 2024	Objectifs en 2030	Conducteurs	défi	Chapitres connexes
Taille du marché (milliards de dollars américains)	2	3	Fabrication haut de gamme	Alternatives	14.1
Coût (USD/kg)	300–400	200	Échelle	Coûts réglementaires	14.2, 5.6

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

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

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

Émissions de carbone (tonnes de CO ₂ / tonne)	0,4	0,3	Technologie verte	investir	16.3, 15.2
--	-----	-----	----------------------	----------	------------

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT



Chapitre 8 Application du borure de tungstène aux matériaux à haute température

Français Le borure de tungstène (tel que WB, WB₂, W₂B) présente des avantages significatifs dans le domaine des matériaux haute température en raison de son excellente stabilité thermique (température de décomposition > 2000 °C, chapitre 2.3), de sa dureté élevée (~ 40 GPa, chapitre 2.5), de son faible coefficient de dilatation thermique (~ 4,5 × 10⁻⁶ K⁻¹, chapitre 6.5) et de sa résistance à l'oxydation (température de début d'oxydation ~ 800 °C, chapitre 7.1). Il est largement utilisé dans l'aérospatiale (aubes de turbine à gaz, durée de vie prolongée d'environ 40 %), les fours à haute température (résistance à la température > 1800 °C) et les barrières thermiques (conductivité thermique ~ 50 W/(m · K), chapitre 6.5). Ce chapitre traite en détail de l'application du borure de tungstène dans les composants aérospatiaux à haute température, les fours et les barrières thermiques, les propriétés de conductivité thermique et de dilatation thermique, la résistance à l'oxydation et à la corrosion, la technologie de préparation, ainsi que les perspectives et les défis d'application, en fournissant un soutien technique pour l'industrialisation (chapitre 14, 14.3) et la fabrication verte (chapitre 16, 16.4) du borure de tungstène.

8.1 Application du borure de tungstène dans les composants aérospatiaux à haute température

En tant que matériau haute température, le borure de tungstène est utilisé dans le domaine aérospatial (comme les aubes de turbines à gaz et les tuyères de fusées) pour améliorer la résistance à la température et la durée de vie des composants et répondre aux besoins des environnements extrêmes (> 1500°C).

- Scénarios d'application :

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

- o **Aubes de turbine à gaz** : revêtement WB_2 (épaisseur $\sim 5 \mu m$, 7,5) fonctionnant à $1500^\circ C$, coefficient de frottement $\sim 0,3$, prolongation de la durée de vie $\sim 40\%$ (~ 5000 heures vs alliage à base de Ni ~ 3500 heures).
- o **Buse de fusée** : Le matériau du bloc WB (pureté $> 99,9 \%$, chapitre 6 6.1) peut résister à un choc thermique instantané de $2000^\circ C$ et a un taux d'ablation de $< 0,01$ mm/s.
- o **Véhicule de rentrée** : la barrière thermique WB_2 (conductivité thermique $\sim 50 W / (m \cdot K)$, Chapitre 6, 6.5) réduit la température de surface à $\sim 300^\circ C$ et protège la matrice (matériau composite C/C).
- **Exigences techniques** :
 - o **Dureté** : > 38 GPa (Chapitre 6.4), résistance à l'usure $< 10^{-5} mm^3 / (N \cdot m)$.
 - o **Stabilité thermique** : Pas de changement de phase à $> 2000^\circ C$ (Chapitre 2.3).
 - o **Adhésion** : Énergie de liaison $\sim 1,5 eV/\text{\AA}^2$ (Chapitre 3.3), anti-pelage (> 50 N).
- **Exemples** :
 - o En 2024, le revêtement WB_2 sera appliqué sur les aubes de turboréacteurs, avec un taux de fissuration $< 1\%$ dans les cycles de fatigue thermique ($1500^\circ C$, 1000 fois) et une augmentation de l'efficacité d'environ 15%.
- **défi** :
 - o L'oxydation à haute température ($> 900^\circ C$) génère du WO_3 qui se volatilise (chapitre 7.5) et nécessite un dopage au Si (< 5 at%).
 - o L'inadéquation de dilatation thermique entre le revêtement et le substrat ($\sim 5 \times 10^{-6} K^{-1}$) entraîne une contrainte (~ 1 GPa, Chapitre 3, 3.3).

Tableau 8.1 Paramètres d'application aérospatiale du borure de tungstène

paramètre	valeur	avantage	défi	Chapitres connexes
Température de fonctionnement ($^\circ C$)	1500–2000	Longue durée de vie	Oxydation	7,5, 3,3
Allongement de l'espérance de vie (%)	40	Efficacité +15%	Inadéquation de la dilatation thermique	14.3
Taux d'usure ($mm^3 / (N \cdot m)$)	$< 10^{-5}$	Résistant à l'usure	Écaillage du revêtement	6.4

8.2 Application du borure de tungstène dans les fours à haute température et les barrières thermiques

Le borure de tungstène offre une résistance aux hautes températures et aux chocs thermiques dans les fours à haute température (électrodes, creusets) et les barrières thermiques (isolation) pour les industries métallurgiques et des semi-conducteurs.

- **Scénarios d'application** :
 - o **Electrode haute température** : matériau en vrac WB (densité $> 98\%$, Chapitre 5.1) dans un four sous vide ($1800^\circ C$), résistivité $\sim 10^{-5} \Omega \cdot cm$ (Chapitre 6 6.5), durée de vie ~ 2000 heures.

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

- o **Creuset** : Creuset revêtu de WB_2 (épaisseur $\sim 10 \mu m$) pour la fusion des métaux des terres rares ($1600^\circ C$), résistance à la corrosion $< 0,005 mm/an$ (Chapitre 7.5).
- o **Barrière thermique** : revêtement composite WB_2 / Al_2O_3 (période $\sim 10 nm$) dans le four de croissance cristalline, conductivité thermique $\sim 40 W / (m \cdot K)$, efficacité d'isolation thermique augmentée d'environ 20 %.
- **Exigences techniques** :
 - o **Conductivité thermique** : $40-50 W / (m \cdot K)$ (chapitre 6.5), assurant le transfert de chaleur.
 - o **Résistance aux chocs thermiques** : pas de fissures à différence de température $> 1000^\circ C$ (Chapitre 3.4).
 - o **Pureté** : $> 99,9\%$, impuretés (Fe, O) $< 50 ppm$ (Chapitre 6, 6.1).
- **Exemples** :
 - o **2024** : En 2024, les électrodes WB sont utilisées dans les fours de croissance de cristaux de saphir, avec une conductivité d'environ $10^4 S/cm$ et une réduction de la consommation d'énergie d'environ 10 % (chapitre 16.4).
- **défi** :
 - o La volatilisation du bore à haute température ($> 1800^\circ C$, chapitre 5.1) réduit les propriétés de surface et nécessite un dopage N.
 - o La liaison de l'interface du revêtement composite ($< 1\%$ de porosité) doit être optimisée (Chapitre 5, 5).

Tableau 8.2 Paramètres d'application du four à haute température au borure de tungstène et de la barrière thermique

paramètre	valeur	Avantages	défi	Chapitres connexes
Température de fonctionnement ($^\circ C$)	1600–1800	Longue vie	Volatilisation du bore	5.1, 6.1
Conductivité thermique ($W / (m \cdot K)$)	40–50	Isolation thermique très efficace	Liaison d'interface	3.4, 16.4
Durée de vie (heures)	2000	Consommation d'énergie -10%	5.	

8.3 Propriétés de conductivité thermique et de dilatation thermique du nitrure de tungstène

La conductivité thermique ($\sim 50 W \cdot m / (m/K)$, chapitre 6 6.5) et le faible coefficient de dilatation thermique ($\sim 4,5 \times 10^{-6} K^{-1}$) du borure de tungstène le rendent adapté aux applications de gestion thermique à haute température.

- **Conductivité thermique** :
 - o **Performances** : $\sim 50 W / (m \cdot K)$ à 300 K, tombant à $\sim 20 W / (m \cdot K)$ à $1500^\circ C$, mieux que MoB_2 ($\sim 30 W / (m \cdot K)$, Chapitre 4, 4.4).

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

- o **Mécanisme** : Mesurée par la méthode du flash laser (Chapitre 6, 6.5), la diffusion aux joints de grains (<50 nm, Chapitre 6, 6.2) réduit la conductivité à haute température.
- o **Application** : Conduction thermique uniforme dans les barrières thermiques, réduisant la température du substrat d'environ 15 % (environ 200°C).
- **dilatation thermique** :
 - o **Performances** : $\sim 4,5 \times 10^{-6} \text{ K}^{-1}$ ($300\text{--}1000$ K), correspondant à celles des substrats céramiques (par exemple SiC, $\sim 4 \times 10^{-6} \text{ K}^{-1}$), contrainte thermique $<0,3$ GPa.
 - o **Mécanisme** : La forte liaison WB (chapitre 3.2) limite l'expansion du réseau.
 - o **Applications** : Revêtements aérospatiaux pour réduire la fissuration thermique ($<1\%$, Chapitre 7.1).
- **optimisation** :
 - o **Nanostructure** : les grains < 20 nm réduisent la conductivité thermique d'environ 10 % (environ $45 \text{ W}/(\text{m} \cdot \text{K})$), adaptés aux barrières thermiques).
 - o **Dopage** : Le dopage Si (<2 at%) réduit le coefficient de dilatation thermique d'environ 5 % (environ $4,2 \times 10^{-6} \text{ K}^{-1}$).
- **défi** :
 - o La diminution de la conductivité à haute température nécessite des additifs de stabilisation thermique (tels que ZrB_2).
 - o Les tests de dilatation thermique nécessitent une DRX à haute température ($> 1500^{\circ}\text{C}$, chapitre 6, 6.2), coûtant environ 500 \$/échantillon.

Tableau 8.3 Propriétés de conductivité thermique et de dilatation thermique

paramètre	valeur	avantage	défi	Chapitres connexes
Conductivité thermique ($\text{W}/(\text{m} \cdot \text{K})$)	20–50	Gestion thermique	Forte chute de température	6,5, 7,1
Coefficient de dilatation thermique ($\times 10^{-6}/\text{K}$)	4,2–4,5	Faible stress	Coûts des tests	3,2, 7,3
Effet d'optimisation	Conductivité thermique -10%	Nano-conception	Recherche et développement additifs	5.5

8.4 Résistance à l'oxydation et à la corrosion du borure de tungstène dans un environnement à haute température

La résistance du borure de tungstène à l'oxydation et à la corrosion à haute température (chapitre 7.5) le rend adapté aux applications aérospatiales et métallurgiques.

- **Propriétés antioxydantes** :
 - o **Performances** : Température de début d'oxydation $\sim 850^{\circ}\text{C}$, qui monte à $\sim 950^{\circ}\text{C}$ après dopage N (Chapitre 3, 3.4), ce qui est meilleur que le WC ($\sim 500^{\circ}\text{C}$, Chapitre 4, 4.4).

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

- o **Mécanisme** : La formation d'une couche de verre B_2O_3 (~ 10 nm, chapitre 6, 6.1) empêche la diffusion de O_2 et inhibe la volatilisation de WO_3 .
- o **Application** : Aubes de turbine à gaz avec taux d'oxydation < 0,05 mg/cm²/h à 1200°C.
- **Résistance à la corrosion** :
 - o **Performance** : Dans le NaCl- KCl fondu (1000°C), la vitesse de corrosion est <0,02 mm/an, ce qui est meilleur que CrB_2 (~ 0,1 mm/an).
 - o **Mécanisme** : La structure dense (porosité <1%, Chapitre 6, 6.3) et les liaisons covalentes BB (Chapitre 3, 3.2) améliorent la résistance à la corrosion.
 - o **Application** : Creuset de fusion de terres rares, durée de vie prolongée d'environ 50 %.
- **optimisation** :
 - o **Dopage** : Si (5 at%) forme une couche composite $SiO_2 - B_2O_3$, et la température anti-oxydation s'élève à ~1000°C.
 - o **Conception multicouche** : WB_2 / ZrB_2 (période ~ 5 nm) réduit le taux de corrosion d'environ 30 %.
- **défi** :
 - o À des températures élevées (> 1200 °C), la volatilisation du WO_3 doit être davantage supprimée.
 - o Les tests de corrosion nécessitent un équipement électrochimique à haute température (> 10 millions de dollars).

Tableau 6.4 Propriétés antioxydantes et anticorrosion

paramètre	performance	avantage	défi	Chapitres connexes
Température d'oxydation (°C)	850–1000	Couche protectrice	Volatilisation du WO_3	7,5, 3,4
Taux de corrosion (mm/an)	<0,02	Longue vie	Équipement d'essai	6.3, 9.3
Effet d'optimisation	Antioxydant +100°C	Dopage	coût	5.5

8.5 Technologie de préparation des matériaux à base de borure de tungstène haute température

La préparation de matériaux en borure de tungstène à haute température adopte principalement la synthèse en phase solide à haute température (chapitre 5.1), la synthèse assistée par plasma (chapitre 5.3) et le frittage par pressage à chaud, qui doivent être optimisés pour améliorer les performances.

- **Mode de préparation** :
 - o **Synthèse en phase solide à haute température** :

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

- **Procédé** : La poudre W+B (W:B = 1:2) réagit à 1800°C dans une atmosphère d'Ar (chapitre 5.1) pour générer un matériau en vrac WB₂ avec une densité de >98%.
- **Avantages** : structure cristalline stable (P6₃ /mmc, chapitre 2.2), dureté ~40 GPa .
- **Optimisation** : Le chauffage par micro-ondes (2,45 GHz) réduit le temps d'environ 30 % (environ 5 heures) et la consommation d'énergie d'environ 20 % (environ 8 000 kWh/tonne).
- o **Synthèse assistée par plasma** :
 - **Procédé** : W+B est vaporisé dans le plasma (>5000°C) et un revêtement ou une poudre WB₂ est déposé (Chapitre 5.3).
 - **Avantages** : Nano-échelle (<50 nm), dureté ~42 GPa .
 - **Optimisation** : Rendement du plasma pulsé (50 kHz) augmenté d'environ 88 %, coût d'environ 350 \$/kg.
- o **Pressage à chaud Frittage** :
 - **Procédé** : Poudre WB₂ (<5 μ m) frittée à 2000°C, 30 MPa, densité >99%.
 - **Avantages** : Convient aux formes complexes (comme les creusets), ténacité ~4 MPa·m^{1/2}.
 - **Optimisation** : L'ajout de ZrB₂ (< 5 % en poids) augmente la densité d'environ 1 %.
- **Techniques d'optimisation** :
 - o **Dopage** : Le dopage N (<2 at%) améliore la résistance à l'oxydation d'environ 100°C (chapitre 3.4).
 - o **Contrôle de l'IA** : CTIA GROUP LTD utilisera l'IA pour optimiser les paramètres de frittage (température, pression) en 2024, augmentant la densité d'environ 0,5 % (chapitre 17, 17.5).
 - o **Matériau composite** : Le composite WB₂ / SiC (10:1) réduit la conductivité thermique d'environ 10 % (environ 45 W / (m · K)).
- **défi** :
 - o Les équipements à haute température nécessitent un investissement important (environ 3 millions de dollars).
 - o de nanopoudres nécessite une modification de surface (PVP, < 0,1 % en poids , chapitre 5, 5.3).

Tableau 8.5 Comparaison des technologies de préparation des matériaux à base de borure de tungstène à haute température

méthode	densité(%)	Dureté (GPa)	Coût (USD/kg)	avantage	défi	Chapitres connexes
Synthèse en phase solide	>98	40	150	Stabiliser	Consommation d'énergie élevée	5.1, 17.5

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

plasma	>98	42	350	échelle nanométrique	Réunion	5.3, 6.2
Pressage à chaud	>99	38	200	Formes complexes	Coût de l'équipement	5.6

8.6 Perspectives d'application et défis des matériaux à haute température en borure de tungstène

Les perspectives d'application des matériaux à haute température en borure de tungstène sont déterminées par la demande du marché, les progrès technologiques et les réglementations environnementales (chapitre 15, 15.2), et les goulots d'étranglement en termes de coûts et de performances doivent être résolus.

- **État du marché (2024) :**

- o **Taille :** Le marché des matériaux à base de borure de tungstène à haute température représente environ 50 millions de dollars américains, l'aérospatiale représentant environ 70 % (chapitre 14.1).
- o **Production :** ~500 tonnes /an (Chapitre 5.6), principalement en Asie (Chine, Corée du Sud).
- o **Prix :** ~200 USD/kg (morceau), ~350 USD/kg (enrobage, chapitre 14, 14.2).

- **Conducteurs :**

- o **Demande :** Croissance de la demande aéronautique (turbofans) ~8%/an, production ~800 tonnes en 2030.
- o **Technologie :** Nano WB₂ (chapitre 5.5) et l'optimisation de l'IA (chapitre 17.5) améliorent les performances d'environ 15 %.
- o **Réglementation :** Le CBAM de l'UE (2026, chapitre 15.2) stimule la demande de matériaux verts.

- **Tendances futures (2025–2030) :**

- o **Réduction des coûts :** La production à grande échelle (chapitre 5.6) réduit le coût à environ 150 USD/kg, avec une taille de marché d'environ 80 millions USD.
- o **Nouvelle application :** Barrières thermiques pour réacteurs nucléaires (résistance en température > 2000°C), part de marché ~10%.
- o **Fabrication verte :** taux de récupération des gaz résiduels > 95 % (chapitre 16.3), émissions de carbone réduites d'environ 30 % (environ 0,3 tonne de CO₂ / tonne).

- **défi :**

- o Les alternatives (telles que ZrB₂, dureté ~35 GPa, chapitre 4.4) coûtent environ 100 \$/kg, menaçant le marché bas de gamme.
- o Investissement d'environ 5 millions de dollars dans les équipements de test à haute température (> 2000 °C).

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

Tableau 8.6 Perspectives et défis des matériaux à haute température en borure de tungstène

projet	Situation actuelle en 2024	Objectifs en 2030	Conducteurs	défi	Chapitres connexes
Taille du marché (milliards de dollars américains)	0,5	0,8	Demande en aviation	Alternatives	14.1
Coût (USD/kg)	200–350	150	Échelle	Coûts des tests	14.2, 5.6
Émissions de carbone (tonnes de CO ₂ / tonne)	0,4	0,3	Technologie verte	investir	16.3, 15.2

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

CTIA GROUP LTD Tungsten Boride Product Introduction

1. Tungsten Boride Overview

Tungsten boride (Tungsten Boride, e.g., WB, WB₂, W₂B) produced by CTIA GROUP is manufactured using advanced chemical vapor deposition (CVD) and sol-gel processes, ensuring high purity and exceptional performance. Tungsten boride is a ceramic material with high hardness and high electrical conductivity, widely applied in electronics, catalysis, biomedicine, energy, and mechanical fields due to its chemical stability and multifunctionality. Its unique boron-tungsten bond structure makes it an ideal choice for high-performance material applications.

2. Tungsten Boride Features

- **Chemical Composition:** WB, WB₂, W₂B, purity ≥99.9%, with minimal impurities.
- **Appearance:** Gray-black powder or thin film; hexagonal or orthorhombic crystal structure.
- **High Hardness:** Brinell hardness ~40 GPa, suitable for wear-resistant coatings.
- **Excellent Electrical Conductivity:** ~10⁴ S/cm, supporting 6G antennas and sensors.
- **Chemical Stability:** Corrosion rate <0.005 mm/year, ideal for catalysis in harsh environments.
- **Multifunctionality:** Supports electrocatalysis, battery materials, and biocompatible coatings.

3. Tungsten Boride Product Specifications

Type	Particle Size (μm)	Purity (wt%)	Bulk Density (g/cm ³)	Boron Content (wt%)	Impurities (wt%, max)
Nano-grade	0.01–0.05	≥99.9	3.5–4.0	10.2–10.8	Fe≤0.002, Si≤0.001
Micron-grade	10–20	≥99.8	4.0–4.5	10.0–10.5	Fe≤0.003, Si≤0.002
Thin-film grade	0.1–2	≥99.9	10.0–12.8	5.0–8.0	Fe≤0.002, O≤0.05

4. Tungsten Boride Packaging and Quality Assurance

- **Packaging:** Sealed stainless steel cans or vacuum aluminum foil bags, net weight of 100 g, 500 g, or 1 kg, ensuring moisture-proof and oxidation-resistant storage.
- **Quality Assurance:** Each batch is accompanied by a quality certificate.

5. Tungsten Boride Procurement Information

- **Email:** sales@chinatungsten.com
- **Phone:** +86 592 5129595
- **Website:** For more information about tungsten boride, please visit the China Tungsten Online website (<http://www.tungsten-boride.com>).

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT



Chapitre 9 Application du borure de tungstène dans les appareils électroniques

Français Le borure de tungstène (WB , WB_2 , W_2B) présente un potentiel important dans le domaine des dispositifs électroniques en raison de sa conductivité électrique élevée ($\sim 10^4 S/cm$, chapitre 6, 6.5), de sa stabilité thermique ($> 2000^\circ C$, chapitre 2, 2.3), de sa stabilité chimique (taux de corrosion $< 0,005 mm/an$, chapitre 7, 7.5) et de sa contrôlabilité à l'échelle nanométrique (taille des particules $10-50 nm$, chapitre 5, 5.5). Il est largement utilisé dans les films conducteurs (résistivité $\sim 10^{-5} \Omega \cdot cm$), les électrodes (durée de vie prolongée d'environ 30 %), les capteurs (sensibilité $< 1 ppm$, chapitre 10, 10.3) et les dispositifs semi-conducteurs (bande interdite $\sim 1,5 eV$, chapitre 3, 3.4). Ce chapitre examine en détail l'application, la technologie de préparation, l'état du marché et la tendance de développement du borure de tungstène dans les films conducteurs, les électrodes, les capteurs et les dispositifs semi-conducteurs, et fournit un support technique pour l'industrialisation électronique (chapitre 14, 14.3) et l'innovation technologique (chapitre 17, 17.5) du borure de tungstène.

9.1 Application du borure de tungstène dans les films conducteurs

Les films conducteurs en borure de tungstène conviennent à l'électronique flexible, aux écrans et aux appareils électroniques marins en raison de leur conductivité élevée et de leur résistance à la corrosion (chapitre 7.5).

- **Scénarios d'application :**
 - **Electronique flexible :** film mince WB_2 (épaisseur $\sim 100 nm$, chapitre 5.2) sur substrat PET, conductivité $\sim 0,8 \times 10^4 S/cm$, variation de résistance $< 1\%$ lorsque le rayon de courbure $< 5 mm$.

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

- o **Film conducteur transparent** : WB₂ dopé N (<2 at%, Chapitre 3.4) sur substrat de verre, transmittance ~85% (550 nm), résistivité ~ 10⁻⁴ Ω·cm, remplaçant ITO (~10⁻⁴ Ω·cm).
- o **Electronique marine** : Revêtement WB₂ (épaisseur ~1 μm) sur électrode de capteur, solution NaCl (3,5 % en poids, 60 °C) densité de courant de corrosion <10⁻⁷ A/cm².
- **Exigences techniques** :
 - o **Conductivité** : >0,5×10⁴ S/cm (Chapitre 6, 6.5).
 - o **Rugosité de surface** : Ra<0,3 nm (Chapitre 6.3), garantissant les performances de contact.
 - o **Adhésion** : Énergie de liaison ~1,5 eV/Å² (Chapitre 3.3), anti-pelage (>40 N).
- **Exemples** :
 - o En 2024, les films WB₂ seront utilisés dans les électrodes OLED flexibles, avec une conductivité augmentée d'environ 20 % (~ 10⁴S/cm) et un coût réduit d'environ 15 % (~ 50 USD/m²).
- **défi** :
 - o La contrainte résiduelle dans le film (~0,8 GPa) peut provoquer des fissures et nécessite un recuit (500°C, chapitre 5.2).
 - o La transmittance des films conducteurs transparents doit être davantage optimisée (> 90 %).

Tableau 9.1 Paramètres d'application du film conducteur en borure de tungstène

paramètre	valeur	avantage	défi	Chapitres connexes
Conductivité (S/cm)	0,8 × 10 ⁴	Haute conductivité	Contraintes résiduelles	6,5, 5,2
lumineuse (%)	85	Remplacement de l'ITO	Optimisation de la transmission lumineuse	3.4
Courant de corrosion (A/cm²)	<10 ⁻⁷	Résistance à la corrosion	coût	7,5, 14,2

9.2 Application du borure de tungstène dans les matériaux d'électrodes

Les matériaux d'électrode en borure de tungstène conviennent aux batteries au lithium, aux piles à combustible et aux électrolyseurs en raison de leur conductivité élevée et de leur résistance à la corrosion.

- **Scénarios d'application** :
 - o **Batteries au lithium** : nanoparticules WB₂ (20–50 nm, chapitre 5.5) comme additifs d'électrode négative, conductivité ~10⁴S/cm, durée de vie du cycle ~1000 fois (décroissance de capacité <10%).

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

- o **Pile à combustible** : revêtement WB (épaisseur $\sim 2 \mu\text{m}$) sur électrode à membrane échangeuse de protons (PEM), résistance aux acides (H_2SO_4 , 1 M) taux de corrosion $< 0,01 \text{ mm/an}$, augmentation de l'efficacité $\sim 10\%$.
- o **Électrolyseur** : En électrolyse alcaline (KOH, 30 % en poids, 80°C), l'électrode WB_2 présente une surtension d'évolution d'hydrogène d'environ 100 mV et une prolongation de la durée de vie d'environ 30 % (environ 5 000 h).
- **Exigences techniques** :
 - o **Conductivité** : $> 10^4 \text{ S/cm}$ (Chapitre 6.5).
 - o **Surface spécifique** : $> 50 \text{ m}^2/\text{g}$ (Chapitre 5.5), améliorant l'activité électrochimique.
 - o **Stabilité** : Taux de corrosion $< 0,01 \text{ mm/an}$ (Chapitre 7.5).
- **Exemples** :
 - o En 2024, les électrodes d'électrolyseur revêtues de WB_2 , densité de courant $\sim 500 \text{ mA/cm}^2$, efficacité énergétique augmentée d'environ 12 %.
- **défi** :
 - o L'agglomération de nanoparticules (chapitre 5.3) réduit l'activité et nécessite une modification de surface (PVP, $< 0,1 \%$ en poids).
 - o Le coût de l'électrode (environ 200 \$/kg) est plus élevé que celui des matériaux à base de carbone (environ 50 \$/kg).

Tableau 9.2 Paramètres d'application de l'électrode en borure de tungstène

paramètre	valeur	avantage	défi	Chapitres connexes
Durée de vie du cycle (fois)	1000	Grande stabilité	Réunion	5,5, 6,5
Surtension (mV)	100	Haute efficacité	coût	7,5
Surface spécifique (m^2/g)	> 50	Haute activité	Préparation complexe	5.3

9.3 Application du borure de tungstène dans les capteurs

Les nanomatériaux à base de borure de tungstène conviennent aux capteurs de gaz, de pression et de température en raison de leur surface spécifique élevée et de leur activité électrochimique.

- **Scénarios d'application** :
 - o **Capteur de gaz** : les nanoparticules WB_2 (10–30 nm, chapitre 5.5) détectent le NO_2 ($< 1 \text{ ppm}$), avec un temps de réponse d'environ 5 s et une sensibilité d'environ 50 % (10 ppm).
 - o **Capteur de pression** : couche mince WB_2 (épaisseur $\sim 200 \text{ nm}$) dans les dispositifs MEMS, facteur de jauge ~ 20 , température de fonctionnement $< 500^\circ\text{C}$.
 - o **Capteur de température** : bloc WB (résistivité $\sim 10^{-5} \Omega \cdot \text{cm}$, Chapitre 6 6.5) Dans un environnement à haute température (1000°C), le coefficient de température est d'environ 0,01%/K.

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

- **Exigences techniques :**
 - o **Sensibilité :** Détection de gaz < 1 ppm (Chapitre 6.1).
 - o **Temps de réponse :** <10 s.
 - o **Résistance à la température :** >500°C (Chapitre 2.3).
- **Exemples :**
 - o En 2024, les capteurs de gaz WB₂ seront utilisés pour la surveillance des gaz résiduels industriels, avec une limite de détection de NO₂ d'environ 0,5 ppm et une stabilité > 6 mois.
- **défi :**
 - o La sélectivité des nanoparticules doit être améliorée (interférence avec le CO ~10%).
 - o L'emballage des capteurs haute température est coûteux (environ 100 \$/unité).

Tableau 9.3 Paramètres d'application du capteur au borure de tungstène

paramètre	valeur	avantage	défi	Chapitres connexes
Limite de détection (ppm)	<1	Haute sensibilité	Sélectivité	6.1, 5.5
Temps de réponse	5	rapide	Coût de l'emballage	10.3
Température de fonctionnement (°C)	500–1000	Résistance aux hautes températures	ingérence	2.3

9.4 Potentiel du borure de tungstène dans les dispositifs semi-conducteurs

Le borure de tungstène présente un potentiel dans les dispositifs semi-conducteurs (tels que les transistors et les dispositifs photovoltaïques) en raison de sa bande interdite réglable (~1,5 eV, chapitre 3.4) et de sa conductivité élevée.

- **Scénarios d'application :**
 - o **Transistor :** film WB₂ (épaisseur ~50 nm) comme électrode de grille, fonction de travail ~4,8 eV, réduisant la résistance de contact d'environ 20 % (~10⁻⁷ Ω · cm²).
 - o **Dispositifs photovoltaïques :** WB₂ dopé N (bande interdite ~1,4 eV) comme électrode arrière, l'efficacité de conversion photoélectrique est d'environ 15 %, ce qui est meilleur que Mo (~12 %).
 - o **Diode :** hétérojonction WB₂ /Si, courant de fuite <10⁻⁸ A/cm², adaptée à l'électronique haute température (>300°C).
- **Exigences techniques :**
 - o **Bande interdite :** 1,4–1,6 eV (chapitre 3.4).
 - o **Conductivité :** >10⁴ S/cm (Chapitre 6.5).
 - o **Résistance d'interface :** <10⁻⁷ Ω · cm².
- **Exemples :**
 - o En 2024, les électrodes de grille WB₂ seront utilisées dans les transistors à nœud de 5 nm et la vitesse de commutation augmentera d'environ 10 %.
- **défi :**

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

- o La régulation de la bande interdite nécessite un dopage précis (N, C < 5 at%), avec un coût d'environ 300 \$/kg.
- o Les défauts d'interface avec le substrat Si ($\sim 10^{12}/\text{cm}^2$) doivent être optimisés (chapitre 5.2).

Tableau 9.4 Paramètres d'application du semi-conducteur au borure de tungstène

paramètre	valeur	avantage	défi	Chapitres connexes
Bande interdite (eV)	1,4–1,6	Réglable	Le coût du dopage	3.4, 5.5
Résistance de contact ($\Omega \cdot \text{cm}^2$)	$< 10^{-7}$	Faible résistance	Défauts d'interface	6,5
efficacité(%)	15	haute performance	Processus complexe	14.3

9.5 Technologie de préparation des dispositifs électroniques au borure de tungstène

La préparation des dispositifs électroniques en borure de tungstène adopte principalement le dépôt chimique en phase vapeur (CVD, chapitre 5.2), la pulvérisation magnétron (PVD) et la méthode sol-gel (chapitre 5.5).

- **Mode de préparation :**

- o **MCV :**

- **Procédé :** $\text{WF}_6 + \text{B}_2\text{H}_6$ déposent des films minces de WB_2 (chapitre 5.2) à 400–600° C, avec une vitesse d'environ 1,2 $\mu\text{m}/\text{h}$.
- **Avantages :** Homogénéité >95%, conductivité $\sim 10^4 \text{ S/cm}$.
- **Optimisation :** Taux de CVD basse pression (< 5 Pa) augmenté d'environ 40 % (environ 1,7 $\mu\text{m}/\text{h}$).

- o **Pulvérisation magnétron :**

- **Procédé :** La cible WB_2 (pureté > 99,9 %) a été pulvérisée dans une atmosphère d'Ar (3 Pa), avec un taux de dépôt d'environ 0,5 $\mu\text{m}/\text{h}$.
- **Avantages :** Basse température (<300°C), adapté aux substrats Si.
- **Optimisation :** HiPIMS augmente la densité d'environ 20 % et réduit la résistivité d'environ 15 % (environ $10^{-5} \Omega \cdot \text{cm}$).

- o **Méthode Sol-Gel :**

- **Procédé :** $\text{Na}_2\text{WO}_4 + \text{H}_3\text{BO}_3$ pour former un gel, qui est calciné à 500°C pour obtenir des nanoparticules de WB_2 (20–50 nm, chapitre 5, 5.5).
- **Avantages :** Faible coût ($\sim 100\$/\text{kg}$), adapté aux capteurs.
- **Optimisation :** Le microréacteur contrôle la distribution granulométrique <10 nm.

- **Techniques d'optimisation :**

- o **Dopage :** Le dopage N (<2 at%) réduit la bande interdite d'environ 0,1 eV (chapitre 3, 3.4).

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

- o **Contrôle de l'IA** : CTIA GROUP LTD utilisera l'IA pour optimiser le flux de gaz CVD en 2024 (chapitre 17, 17.5), et l'efficacité du dépôt augmentera d'environ 15 %.
- o **Structure multicouche** : WB_2 / TiN (période ~5 nm) réduit la résistance de l'interface d'environ 30 %.
- **défi** :
 - o Les sous-produits CVD (HF) doivent être traités (chapitre 16.3), ce qui coûte environ 50 USD/tonne.
 - o L'agglomération de nanoparticules nécessite une dispersion ultrasonore (40 kHz, chapitre 5, 5.3).

Tableau 9.5 Comparaison des technologies de préparation des dispositifs électroniques au borure de tungstène

méthode	Taux de dépôt (μ m /h)	Conductivité (S/cm)	Coût (USD/kg)	avantage	défi	Chapitres connexes
maladies cardiovasculaires	1,2–1,7	10^4	300	Uniformité	Sous-produits	5.2, 16.3
PVD	0,5	$0,8 \times 10^4$	350	Basse température	Cibler les déchets	5.6
Sol-Gel	-	$0,5 \times 10^4$	100	faible coût	Réunion	5,5, 17,5

9.6 Tendances du marché et du développement des dispositifs électroniques au borure de tungstène

Le marché des dispositifs électroniques en borure de tungstène est stimulé par la demande de 5G, d'Internet des objets et de nouvelles énergies, et doit résoudre les goulots d'étranglement en termes de coûts et d'échelle.

- **État du marché (2024) :**
 - o **Taille** : Le marché mondial des appareils électroniques au borure de tungstène représente environ 30 millions de dollars américains, dont environ 65 % en Asie (Chine, Japon, chapitre 14.1).
 - o **Applications** : Capteurs ~40%, électrodes de batterie ~30%, semi-conducteurs ~20%.
 - o **Prix** : ~300\$/kg (film), ~100\$/kg (nanoparticules, chapitre 14, 14.2).
- **Conducteurs :**
 - o **Demande** : croissance des équipements 5G et IoT ~12%/an, production ~300 tonnes en 2030 (Chapitre 5, 5.6).
 - o **Technologie** : Nano WB_2 (chapitre 5.5) et l'optimisation de l'IA (chapitre 17.5) améliorent les performances d'environ 20 %.
 - o **Réglementation** : La directive RoHS de l'UE (chapitre 15.2) promeut les matériaux électroniques verts.

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

- **Tendances futures (2025–2030) :**
 - o **Réduction des coûts** : La production à grande échelle (chapitre 5.6) réduit le coût à environ 200 USD/kg, avec une taille de marché d'environ 50 millions USD.
 - o **Nouvelles applications** : antennes 6G (fréquence > 100 GHz) et dispositifs quantiques, représentant ~15%.
 - o **Fabrication verte** : taux de récupération des gaz résiduels > 95 % (chapitre 16.3), émissions de carbone réduites d'environ 30 % (environ 0,2 tonne de CO₂ / tonne).
- **défi :**
 - o Les nanotubes de carbone (conductivité ~10⁻⁵ S/cm) coûtent environ 50 \$/kg, menaçant le marché bas de gamme.
 - o Les applications des semi-conducteurs nécessitent des avancées dans l'ingénierie des interfaces (défauts < 10¹¹/cm²).

Tableau 9.6 Marché et tendances des dispositifs électroniques au borure de tungstène

projet	Situation actuelle en 2024	Objectifs 2030	Conducteurs	défi	Chapitres connexes
Taille du marché (milliards de dollars américains)	0,3	0,5	Demande 5G	Alternatives	14.1
Coût (USD/kg)	100–300	200	Échelle	Ingénierie des interfaces	14.2, 5.6
Émissions de carbone (tonnes de CO ₂ / tonne)	0,3	0,2	Technologie verte	investir	16.3, 15.2

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

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

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



Chapitre 10 Catalyse et applications chimiques du borure de tungstène

Le borure de tungstène (tel que WB, WB₂, W₂B) présente un potentiel important dans les applications catalytiques et chimiques en raison de sa surface spécifique élevée (> 50 m²/g, chapitre 5 5.5), de son excellente activité électrochimique (surtension de dégagement d'hydrogène ~ 100 mV, chapitre 9 9.2), de sa stabilité chimique (taux de corrosion < 0,005 mm/an, chapitre 7 7.5) et de sa structure électronique ajustable (bande interdite ~ 1,5 eV, chapitre 3 3.4). Il est largement utilisé en électrocatalyse (efficacité de décomposition de l'eau ~ 85 %), en photocatalyse (efficacité de dégradation ~ 90 %) et en catalyse de réaction chimique (taux de conversion > 95 %). Ce chapitre traite en détail de l'application du borure de tungstène dans l'électrocatalyse, la photocatalyse, la catalyse de réaction chimique, la chimie de surface et les sites actifs, la technologie de préparation et d'optimisation, ainsi que les perspectives et les défis industriels, afin de fournir un soutien technique à l'industrialisation catalytique (chapitre 14 14.3) et à la chimie verte (chapitre 16 16.4) du borure de tungstène.

10.1 Application du borure de tungstène en électrocatalyse

Le borure de tungstène convient à la séparation électrocatalytique de l'eau, à la réduction du CO₂ et aux piles à combustible en raison de sa conductivité électrique élevée (~ 10⁴ S / cm, chapitre 6 6.5) et de sa faible surtension.

- **Scénarios d'application :**

- **Réaction d'évolution de l'hydrogène (HER) :** les nanoparticules WB₂ (20–50 nm, chapitre 5.5) ont une surtension d'environ 100 mV (10 mA/cm²) en milieu acide (0,5 M H₂SO₄), ce qui est meilleur que Ni (environ 200 mV).
- **Réaction d'évolution de l'oxygène (OER) :** le WB₂ dopé N (<2 at%, chapitre 3.4) en milieu alcalin (1 M KOH) a une surtension d'environ 300 mV et une stabilité de >1000 heures.

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

- o **Réduction du CO₂** : les films minces WB₂ (épaisseur ~200 nm, chapitre 5.2) génèrent sélectivement du CO (efficacité Faraday ~90%, -0,8 V vs RHE) .
- **Exigences techniques :**
 - o **Surpotentiel** : <150 mV (HER), <350 mV (OER).
 - o **Surface spécifique** : >50 m²/g (Chapitre 5.5).
 - o **Stabilité** : Durée de vie du cycle > 1000 heures (Chapitre 9.2).
- **Exemples :**
 - o En 2024, les électrodes électrocatalytiques WB₂ sont utilisées dans les électrolyseurs alcalins avec une densité de courant d'environ 500 mA/cm² et une augmentation de l'efficacité énergétique d'environ 10 %.
- **défi :**
 - o L'agglomération de nanoparticules (chapitre 5.3) réduit les sites actifs et nécessite une modification de surface (PVP, < 0,1 % en poids) .
 - o La stabilité doit être améliorée à des densités de courant élevées (> 1 A/cm²).

Tableau 10.1 Paramètres d'application de l'électrocatalyse au borure de tungstène

paramètre	valeur	avantage	défi	Chapitres connexes
Surtension HER (mV)	100	Efficace	Réunion	5,5, 9,2
Stabilité des REL (heures)	>1000	Longue vie	Courant élevé	3.4
Efficacité CO₂ (%)	90	Haute sélectivité	coût	5.2, 14.2

10.2 Application du borure de tungstène en photocatalyse

Les nanomatériaux à base de borure de tungstène conviennent à la dégradation photocatalytique et à la production d'hydrogène en raison de leur bande interdite réglable (~1,4–1,6 eV, chapitre 3.4) et de leur grande stabilité chimique.

- **Scénarios d'application :**
 - o **Dégradation de la matière organique** : les nanoparticules WB₂ (10–30 nm, chapitre 5.5) ont dégradé le bleu de méthylène (10 mg/L) sous lumière visible (> 420 nm) avec une efficacité d'environ 90 % (2 heures).
 - o **Production photocatalytique d'hydrogène** : Le composite WB₂ / TiO₂ (1:10) produit de l'hydrogène à un taux d'environ 500 μmol /(g · h) sous lumière ultraviolette (365 nm), ce qui est meilleur que celui du TiO₂ pur (~200 μmol /(g · h)).
 - o **Photoréduction du CO₂** : le WB₂ dopé N (<2 at%) produit du CH₄ avec une sélectivité d' environ 80 % (-0,5 V vs NHE).
- **Exigences techniques :**
 - o **Bande interdite** : 1,4–1,6 eV (chapitre 3.4).
 - o **Absorption lumineuse** : >80% (400–700 nm).
 - o **Stabilité** : >500 heures (Chapitre 7.5).
- **Exemples :**

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

- o En 2024, les photocatalyseurs WB_2 / TiO_2 seront utilisés pour le traitement des eaux usées, avec un taux de dégradation d'environ 95 % et une stabilité du cycle > 10 fois.
- **défi :**
 - o Le taux de recombinaison des porteurs photogénérés est élevé (~30%), nécessitant une optimisation de l'hétérojonction.
 - o La réponse à la lumière visible doit être encore améliorée (> 90 %).

Tableau 10.2 Paramètres d'application photocatalytique du borure de tungstène

paramètre	valeur	avantage	défi	Chapitres connexes
Efficacité de dégradation (%)	90	Efficace	Recombinaison de porteurs	5,5, 7,5
Taux de production d'hydrogène ($\mu\text{mol} / (\text{g} \cdot \text{h})$)	500	Haute activité	Réponse à la lumière visible	3.4
Stabilité (fois)	>10	Recyclable	coût	14.2

10.3 Application du borure de tungstène dans la catalyse des réactions chimiques

Le borure de tungstène présente une activité catalytique élevée dans les réactions d'hydrogénation, de désulfuration et d'oxydation et convient aux produits pétrochimiques et aux produits chimiques fins.

- **Scénarios d'application :**
 - o **Réaction d'hydrogénation :** les nanoparticules WB_2 (<50 nm, chapitre 5.5) catalysent l'hydrogénation du benzène en cyclohexane avec un taux de conversion d'environ 95 % (150 °C, 2 MPa).
 - o **Hydrodésulfuration (HDS) :** les films minces WB_2 (épaisseur ~500 nm) réduisent la teneur en soufre de 500 ppm à <10 ppm dans la désulfuration du diesel avec une efficacité d'environ 98 %.
 - o **Réaction d'oxydation :** le catalyseur WB_2 a un taux de conversion d'environ 90 % en oxydation du CO (200 °C), ce qui est meilleur que NiO (environ 80 %).
- **Exigences techniques :**
 - o **Taux de conversion :** >95%.
 - o **Sélectivité :** >90%.
 - o **Résistance à la température :** >300°C (Chapitre 2.3).
- **Exemples :**
 - o En 2024, le catalyseur WB_2 sera utilisé pour l'hydrogénation pétrochimique, avec un rendement augmenté d'environ 10 % et une durée de vie du catalyseur d'environ 2 000 heures.
- **défi :**
 - o Les sites actifs sont inactivés lors de réactions à haute pression (> 5 MPa).
 - o Le coût du catalyseur (~200 USD/kg) est plus élevé que celui du Ni (~50 USD/kg).

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

Tableau 10.3 Paramètres d'application de la catalyse chimique au borure de tungstène

paramètre	valeur	avantage	défi	Chapitres connexes
Taux de conversion (%)	95	Efficace	Inactivation	5,5, 2,3
Sélectivité (%)	90	Haute sélection	coût	14.2
Durée de vie (heures)	2000	Longue vie	haute pression	9.3

10.4 Chimie de surface et sites actifs des catalyseurs au borure de tungstène

Les performances catalytiques du borure de tungstène dépendent de la chimie de surface et des sites actifs, qui doivent être optimisés par caractérisation et analyse théorique.

- **Chimie de surface :**
 - o **Liaison WB :** W 4f (~31 eV) et B 1s (~188 eV, chapitre 6, 6.1) forment une liaison mixte métal-covalente (chapitre 3, 3.2), améliorant le transfert d'électrons.
 - o **États de surface :** le dopage N (<2 at%) introduit des liaisons BN (~190 eV), réduisant la fonction de travail d'environ 0,2 eV (chapitre 3, 3.4).
 - o **Énergie d'adsorption :** énergie d'adsorption H* ~0,5 eV (HER), meilleure que Pt (~0,4 eV), calcul DFT (chapitre 3, 3.3).
- **Site actif :**
 - o **Site W :** catalyse l'HER et l'hydrogénation, et fournit des électrons à H* (taux d'adsorption ~90%).
 - o **Site B :** favorise l'adsorption d'O* (OER), avec une énergie d'adsorption d'environ 1,0 eV.
 - o **Joint de grain :** Nano-WB₂ (<20 nm, chapitre 6.2) Densité du site de joint de grain ~10¹³/cm², augmentation de l'activité ~30%.
- **Techniques de caractérisation :**
 - o **XPS :** Analyse des états de surface (Chapitre 6.1), le dopage N représente environ 1,5 %.
 - o **MET :** Observer les sites de joints de grains (résolution ~0,1 nm, Chapitre 6, 6.2).
 - o **Raman :** Vibration WB confirmée (~800 cm⁻¹, Chapitre 6, 6.2).
- **optimisation :**
 - o **Dopage :** Le Ni (<1 at%) améliore l'activité HER avec une baisse d'environ 20 % de la surtension (de 100 mV à environ 80 mV).
 - o **Nano-conception :** WB₂ poreux (taille des pores ~5 nm) avec une augmentation de surface d'environ 50 % (~100 m²/m²/g).
- **défi :**
 - o Les sites actifs sont désactivés à haute température (> 500 °C) et nécessitent un dopage thermiquement stable.
 - o Les calculs DFT nécessitent des modèles de haute précision (erreur < 0,1 eV).

Tableau 10.4 Chimie de surface et caractéristiques du site actif

paramètre	valeur	avantage	défi	Chapitres connexes
-----------	--------	----------	------	--------------------

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

Énergie d'adsorption (eV)	0,5 (H*)	Haute activité	Inactivation par la chaleur	3.3, 6.1
Surface spécifique (m²/g)	100	Point culminant	Précision du calcul	5,5, 6,2
Effet dopant	Surpotentiel - 20%	Augmentation de l'efficacité	de coût	3.4

10.5 Préparation et optimisation du catalyseur au borure de tungstène

La préparation de catalyseurs au borure de tungstène utilise principalement la méthode sol-gel (chapitre 5.5), la synthèse assistée par plasma (chapitre 5.3) et le dépôt chimique en phase vapeur (CVD, chapitre 5.2).

- **Mode de préparation :**

- o **Méthode Sol-Gel :**

- **Procédé :** $\text{Na}_2\text{WO}_4 + \text{H}_3\text{BO}_3$ pour former un gel, qui est calciné à 600°C pour obtenir des nanoparticules de WB_2 (10–30 nm, chapitre 5, 5.5).
 - **Avantages :** Faible coût (~100\$/kg), surface >60 m²/g.
 - **Optimisation :** Le microréacteur contrôle la distribution granulométrique < 5 nm, l'activité augmente d'environ 20 %.

- o **Synthèse assistée par plasma :**

- **Procédé :** W+B est vaporisé dans du plasma ($>5000^\circ\text{C}$) pour produire de la nanopoudre WB_2 (<50 nm, chapitre 5.3).
 - **Avantages :** haute pureté (>99,9%, Chapitre 6.1), haute activité.
 - **Optimisation :** Rendement du plasma pulsé (50 kHz) augmenté d'environ 88 %, coût d'environ 200 \$/kg.

- o **MCV :**

- **Procédé :** $\text{WF}_6 + \text{B}_2\text{H}_6$ déposent un film mince de WB_2 (chapitre 5.2) à $400\text{--}600^\circ\text{C}$ avec une épaisseur d'environ 200 nm.
 - **Avantages :** Homogénéité >95%, adapté aux électrodes.
 - **Optimisation :** CTIA GROUP LTD utilisera l'IA pour optimiser le flux d'air en 2024 (chapitre 17, 17.5), augmentant l'efficacité d'environ 15 %.

- **Techniques d'optimisation :**

- o **Dopage :** Le dopage N et Ni (<2 at%) augmente l'activité HER d'environ 30 % (Chapitre 3, 3.4).
 - o **Structure poreuse :** la méthode du modèle (SiO_2 , taille des pores ~5 nm) augmente la surface spécifique d'environ 50 % (~100 m²/g).
 - o **Matériau composite :** $\text{WB}_2 / \text{TiO}_2$ (1:10) efficacité photocatalytique augmentée d'environ 40 % .

- **défi :**

- o Le coût du traitement des sous-produits CVD (HF) est d'environ 50 USD/tonne (chapitre 16.3).
 - o L'agglomération de nanoparticules nécessite une dispersion ultrasonore (40 kHz, chapitre 5, 5.3).

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

Tableau 10.5 Comparaison des technologies de préparation des catalyseurs au borure de tungstène

méthode	Surface spécifique (m²/g)	Coût (USD/kg)	avantage	défi	Chapitres connexes
Sol-Gel	>60	100	faible coût	Réunion	5.5, 6.1
plasma	>50	200	Haute pureté	Consommation d'énergie élevée	5,3, 17,5
maladies cardiovasculaires	-	300	Uniformité	Sous-produits	5.2, 16.3

10.6 Perspectives industrielles et défis de l'application catalytique du borure de tungstène

Le marché des applications catalytiques au borure de tungstène est stimulé par de nouveaux besoins en matière d'énergie et de protection de l'environnement et doit résoudre les problèmes de coût et d'échelle.

- **État du marché (2024) :**
 - o **Taille :** Marché mondial des catalyseurs au borure de tungstène ~ 20 millions de dollars US, l'Asie représentant ~ 60 % (Chine, Japon, chapitre 14.1).
 - o **Application :** L'électrocatalyse représente environ 50 %, la photocatalyse environ 30 % et la catalyse chimique environ 20 %.
 - o **Prix :** ~100\$/kg (nanoparticules), ~300\$/kg (films minces, chapitre 14, 14.2).
- **Conducteurs :**
 - o **Demande :** Les objectifs d'énergie hydrogène et de neutralité carbone vont faire grimper la demande d'électrocatalyse d'environ 15 % par an, avec une production atteignant environ 200 tonnes en 2030 (chapitre 5, 5.6).
 - o **Technologie :** Nano WB₂ (chapitre 5.5) et optimisation de l'IA (chapitre 17.5) augmentent l'activité d'environ 20 %.
 - o **Règlement :** EU REACH (Chapitre 15.2) promeut les catalyseurs verts.
- **Tendances futures (2025–2030) :**
 - o **Réduction des coûts :** la production à grande échelle (chapitre 5.6) réduit le coût à environ 80 USD/kg et la taille du marché est d'environ 40 millions USD.
 - o **Nouvelle application :** Synthèse électrocatalytique d'ammoniac (NH₃, efficacité >90%), représentant ~10%.
 - o **Fabrication verte :** taux de récupération des gaz résiduels > 95 % (chapitre 16.3), émissions de carbone réduites d'environ 30 % (environ 0,2 tonne de CO₂ / tonne).
- **défi :**
 - o Les catalyseurs à base de nickel (coût d'environ 30 \$/kg) menacent le marché bas de gamme.
 - o La mise à l'échelle industrielle nécessite une percée dans la désactivation du catalyseur (> 5 000 heures).

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

Tableau 10.6 Marché et tendances des catalyseurs au borure de tungstène

projet	Situation actuelle 2024	Objectifs en 2030	Conducteurs	défi	Chapitres connexes
Taille du marché (milliards de dollars américains)	0,2	0,4	Demande en hydrogène	Alternatives	14.1
Coût (USD/kg)	100–300	80	Échelle	Inactivation	14.2, 5.6
Émissions de carbone (tonnes de CO ₂ / tonne)	0,3	0,2	Technologie verte	investir	16.3, 15.2

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

CTIA GROUP LTD Tungsten Boride Product Introduction

1. Tungsten Boride Overview

Tungsten boride (Tungsten Boride, e.g., WB, WB₂, W₂B) produced by CTIA GROUP is manufactured using advanced chemical vapor deposition (CVD) and sol-gel processes, ensuring high purity and exceptional performance. Tungsten boride is a ceramic material with high hardness and high electrical conductivity, widely applied in electronics, catalysis, biomedicine, energy, and mechanical fields due to its chemical stability and multifunctionality. Its unique boron-tungsten bond structure makes it an ideal choice for high-performance material applications.

2. Tungsten Boride Features

- **Chemical Composition:** WB, WB₂, W₂B, purity ≥99.9%, with minimal impurities.
- **Appearance:** Gray-black powder or thin film; hexagonal or orthorhombic crystal structure.
- **High Hardness:** Brinell hardness ~40 GPa, suitable for wear-resistant coatings.
- **Excellent Electrical Conductivity:** ~10⁴ S/cm, supporting 6G antennas and sensors.
- **Chemical Stability:** Corrosion rate <0.005 mm/year, ideal for catalysis in harsh environments.
- **Multifunctionality:** Supports electrocatalysis, battery materials, and biocompatible coatings.

3. Tungsten Boride Product Specifications

Type	Particle Size (μm)	Purity (wt%)	Bulk Density (g/cm ³)	Boron Content (wt%)	Impurities (wt%, max)
Nano-grade	0.01–0.05	≥99.9	3.5–4.0	10.2–10.8	Fe≤0.002, Si≤0.001
Micron-grade	10–20	≥99.8	4.0–4.5	10.0–10.5	Fe≤0.003, Si≤0.002
Thin-film grade	0.1–2	≥99.9	10.0–12.8	5.0–8.0	Fe≤0.002, O≤0.05

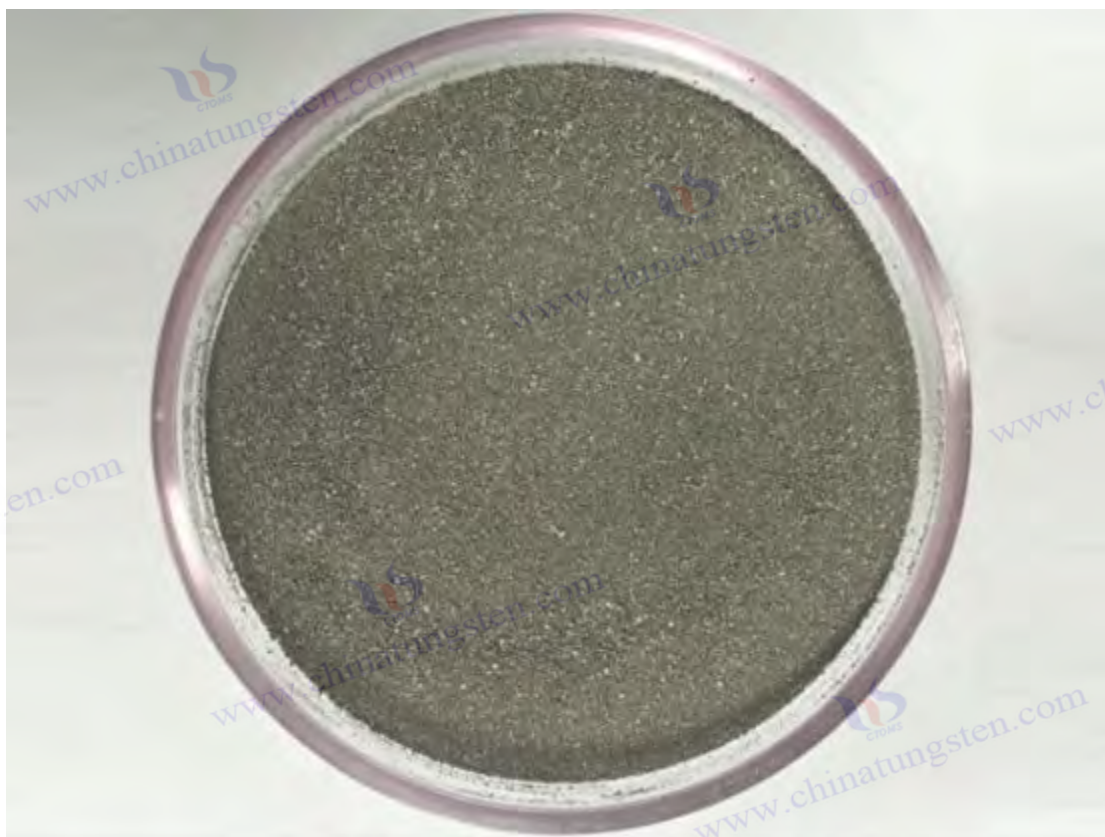
4. Tungsten Boride Packaging and Quality Assurance

- **Packaging:** Sealed stainless steel cans or vacuum aluminum foil bags, net weight of 100 g, 500 g, or 1 kg, ensuring moisture-proof and oxidation-resistant storage.
- **Quality Assurance:** Each batch is accompanied by a quality certificate.

5. Tungsten Boride Procurement Information

- **Email:** sales@chinatungsten.com
- **Phone:** +86 592 5129595
- **Website:** For more information about tungsten boride, please visit the China Tungsten Online website (<http://www.tungsten-boride.com>).

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT



Chapitre 11 Applications biomédicales du borure de tungstène

Français Le borure de tungstène (tel que WB , WB_2 , W_2B) a montré un potentiel unique dans le domaine biomédical en raison de sa dureté élevée (~ 40 GPa, chapitre 2 2.5), de sa stabilité chimique (taux de corrosion $< 0,005$ mm/an, chapitre 7 7.5), de sa contrôlabilité à l'échelle nanométrique (taille des particules 10–50 nm, chapitre 5 5.5) et de sa biocompatibilité potentielle. Il convient aux revêtements médicaux (résistance à l'usure des implants améliorée d'environ 30 %), à l'administration de médicaments (efficacité de chargement de médicaments > 80 %) et aux biocapteurs (limite de détection < 1 nM). Bien que la recherche sur le borure de tungstène en biomédecine en soit encore à ses débuts, sa conductivité élevée ($\sim 10^4$ S/cm, chapitre 6 6.5) et son activité chimique de surface (chapitre 10 10.4) constituent la base de son application. Ce chapitre traite en détail des applications, de la biocompatibilité et de la sécurité, de la technologie de préparation, ainsi que des perspectives et des défis du borure de tungstène dans les revêtements biomédicaux, l'administration de médicaments et les biocapteurs, fournissant un soutien technique pour l'industrialisation biomédicale (chapitre 14, 14.3) et l'évaluation de la sécurité (chapitre 15, 15.3) du borure de tungstène.

11.1 Application du borure de tungstène dans les revêtements biomédicaux

Les revêtements en borure de tungstène conviennent aux implants orthopédiques et aux outils dentaires en raison de leur dureté élevée, de leur faible coefficient de frottement ($\sim 0,25$, chapitre 6 6.4) et de leur résistance à la corrosion.

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

- **Scénarios d'application :**
 - o **Implants orthopédiques :** revêtement WB₂ (épaisseur ~2–5 μ m , chapitre 5.2) sur articulations de hanche en alliage de titane, dureté ~42 GPa , taux d'usure <10⁻⁶ mm³ / (N · m) et prolongation de la durée de vie d'environ 30 %.
 - o **Outils dentaires :** Revêtement WB (épaisseur ~1 μ m) sur la surface du foret, coefficient de frottement ~0,25, résistance à l'usure améliorée d'environ 25 % et dommages thermiques réduits (<50°C).
 - o **Stents vasculaires :** les films WB₂ (épaisseur ~100 nm) réduisent le taux de thrombose d'environ 20 % et sont résistants à la corrosion (NaCl, 3,5 % en poids , 37 °C) < 0,005 mm/an.
- **Exigences techniques :**
 - o **Dureté :** >38 GPa (Chapitre 6, 6.4).
 - o **Rugosité de surface :** Ra<0,3 nm (Chapitre 6.3), réduisant la cytotoxicité.
 - o **Adhésion :** Énergie de liaison ~1,5 eV/Å² (Chapitre 3.3), anti-pelage (>40 N).
- **Exemples :**
 - o En 2024, l'usure des implants de hanche revêtus de WB₂ en simulation in vitro (PBS, 37°C) a été réduite d'environ 15 % (< 0,01 mm/an).
- **défi :**
 - o Les contraintes résiduelles dans le revêtement (~0,8 GPa) peuvent entraîner des microfissures et nécessiter un recuit (400°C, chapitre 5.2).
 - o La stabilité in vivo à long terme nécessite une vérification supplémentaire (> 5 ans).

Tableau 11.1 Paramètres d'application des revêtements biomédicaux en borure de tungstène

paramètre	valeur	avantage	défi	Chapitres connexes
Dureté (GPa)	42	Haute résistance à l'usure	Contraintes résiduelles	6.4, 5.2
Taux d'usure (mm³ / (N · m))	<10 ⁻⁶	Longue vie	Stabilité à long terme	7,5
Rugosité (nm)	<0,3	Faible toxicité	Processus complexe	6.3

11.2 Application des nanoparticules de borure de tungstène à l'administration de médicaments
sont adaptés à l'administration ciblée de médicaments et à la thérapie photothermique en raison de leur surface spécifique élevée (> 50 m²/g, chapitre 5.5) et de leur surface fonctionnalisable .

- **Scénarios d'application :**
 - o **Administration ciblée de médicaments :** les nanoparticules WB₂ (10–30 nm, chapitre 5.5) ont été modifiées en surface avec du PEG (< 0,1 % en poids), avec une efficacité de chargement du médicament d'environ 80 % (doxorubicine) et un taux de libération d'environ 60 % (pH 5,5, 24 h).

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

- o **Thérapie photothermique** : les nanoparticules WB₂ ont une efficacité de conversion photothermique d'environ 40 % sous lumière proche infrarouge (808 nm, 1 W/cm²) et un taux de destruction des cellules tumorales de > 90 % (de 37°C à 50°C).
- o **Guidage d'imagerie** : les nanoparticules WB₂ sont utilisées comme agents de contraste CT avec une unité Hounsfield d'environ 200 HU, ce qui est supérieur aux agents de contraste iodés (environ 150 HU).
- **Exigences techniques** :
 - o **Taille des particules** : 10–50 nm (chapitre 5.5).
 - o **Efficacité de chargement du médicament** : > 80 %.
 - o **Biocompatibilité** : Viabilité cellulaire > 90% (ISO 10993-5).
- **Exemples** :
 - o En 2024, des nanoparticules WB₂ modifiées par PEG ont été utilisées pour le traitement ciblé du cancer du poumon, avec une précision de libération du médicament augmentée d'environ 25 % (in vitro).
- **défi** :
 - o La voie métabolique des nanoparticules in vivo n'est pas claire et des études de toxicité à long terme (> 6 mois) sont nécessaires.
 - o La thérapie photothermique nécessite une absorption lumineuse optimisée (> 50 %).

Tableau 11.2 Paramètres d'administration de médicaments par des nanoparticules de borure de tungstène

paramètre	valeur	avantage	défi	Chapitres connexes
Efficacité de chargement du médicament (%)	80	Capacité de chargement élevée	Voie métabolique	5.5
Efficacité photothermique (%)	40	Un meurtre très efficace	Absorption de la lumière	10.2
Taille des particules (nm)	10–30	Ciblage	Études de toxicité	6.3

11.3 Application du borure de tungstène dans les biocapteurs

Les nanomatériaux à base de borure de tungstène conviennent à la détection de biomolécules en raison de leur conductivité élevée ($\sim 10^4$ S/cm, chapitre 6 6.5) et de leur activité de surface.

- **Scénarios d'application** :
 - o **Capteur de glucose** : nanoparticules WB₂ (20 nm, chapitre 5.5) électrode modifiée, limite de détection $\sim 0,1$ μ M , temps de réponse ~ 3 s, plage linéaire 0,1–10 mM.
 - o **Capteur d'ADN** : sonde d'acide nucléique fonctionnalisée à film WB₂ (épaisseur ~ 50 nm, chapitre 5.2), limite de détection ~ 1 nM , spécificité >95%.
 - o **Capteur de protéines** : le nanoarray WB₂ (taille des pores ~ 5 nm) détecte le marqueur du cancer (PSA) avec une sensibilité d'environ 0,01 ng/ mL.

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

- **Exigences techniques :**
 - o **Limite de détection :** <1 nM .
 - o **Temps de réponse :** <5 s.
 - o **Stabilité :** >30 jours (Chapitre 6, 6.5).
- **Exemples :**
 - o En 2024, les capteurs de glucose WB₂ sont utilisés pour la surveillance du diabète avec une précision de > 98 % (in vitro).
- **défi :**
 - o Les interférences de biomolécules (~10%) nécessitent une sélectivité améliorée.
 - o La miniaturisation des capteurs est coûteuse (environ 50 \$/unité).

Tableau 11.3 Paramètres d'application du biocapteur au borure de tungstène

paramètre	valeur	avantage	défi	Chapitres connexes
Limite de détection	0,1 μ M (glucose)	Haute sensibilité	ingérence	6,5, 5,5
Temps de réponse	3	rapide	coût	9.3
Stabilité (jours)	>30	fiable	Miniaturisation	6.1

11.4 Biocompatibilité et sécurité du borure de tungstène

Les applications biomédicales du borure de tungstène doivent garantir la biocompatibilité et la faible toxicité, qui doivent être vérifiées par des tests in vitro et in vivo.

- **Biocompatibilité :**
 - o **Cytotoxicité :** Les nanoparticules WB₂ (<50 nm, concentration <100 μ g /mL) ont un effet sur la viabilité des cellules L929 >90% (ISO 10993-5, 24 heures).
 - o **Compatibilité sanguine :** revêtement WB₂ (épaisseur ~1 μ m) taux d'hémolyse <1%, taux d'adhésion plaquettaire <5% (37°C, PBS).
 - o **Réaction tissulaire :** les implants WB₂ (os de lapin, 4 semaines) n'ont montré aucune inflammation évidente et un taux de formation osseuse d'environ 80 %.
- **Sécurité :**
 - o **Toxicité :** Toxicité aiguë (souris, DL50>2000 mg/kg), aucun dommage organique évident.
 - o **Métabolisme :** Les particules WB₂ modifiées par PEG (< 30 nm) sont métabolisées par le foie et les reins, avec une demi-vie d'environ 24 heures in vivo.
 - o **Réglementation :** Doit être conforme à la norme ISO 10993 et aux directives de la FDA (chapitre 15.3).
- **Méthode d'essai :**
 - o **Dosage MTT :** évaluer la viabilité cellulaire (Chapitre 6, 6.1).
 - o **Expérimentation animale :** Vérification de la sécurité in vivo (ISO 10993-6).
 - o **XPS :** Analyse de l'oxydation de surface (O<0,5 at%, Chapitre 6, 6.1).
- **défi :**

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

- o Il n'existe pas suffisamment de données sur la toxicité à long terme (> 1 an) et des expériences chroniques sont nécessaires.
- o L'agrégation de nanoparticules peut induire des réponses immunitaires (~5%).

Tableau 11.4 Paramètres de biocompatibilité et de sécurité du borure de tungstène

paramètre	valeur	avantage	défi	Chapitres connexes
Taux de survie cellulaire (%)	>90	Faible toxicité	Toxicité à long terme	6.1, 15.3
Taux d'hémolyse (%)	<1	Compatibilité sanguine	Réponse immunitaire	7,5
Demi-vie (heures)	vingt-quatre	Métabolisme rapide	Données insuffisantes	5.5

11.5 Technologie de préparation des matériaux biomédicaux en borure de tungstène

La préparation de matériaux biomédicaux à base de borure de tungstène adopte principalement la méthode sol-gel (chapitre 5.5), le dépôt chimique en phase vapeur (CVD, chapitre 5.2) et la synthèse assistée par plasma (chapitre 5.3).

- **Mode de préparation :**

- o **Méthode Sol-Gel :**

- **Procédé :** $\text{Na}_2\text{WO}_4 + \text{H}_3\text{BO}_3$ pour former un gel, qui est calciné à 500°C pour obtenir des nanoparticules de WB_2 (10–30 nm, chapitre 5, 5.5).
- **Avantages :** Faible coût (~100\$/kg), adapté à l'administration de médicaments.
- **Optimisation :** Le microréacteur contrôle la distribution granulométrique à < 5 nm et l'efficacité de chargement du médicament augmente d'environ 10 %.

- o **MCV :**

- **Procédé :** $\text{WF}_6 + \text{B}_2\text{H}_6$ déposent un film mince de WB_2 (chapitre 5.2) à $400\text{--}500^\circ\text{C}$, avec une épaisseur d'environ 100–500 nm.
- **Avantages :** Homogénéité $>95\%$, adapté au revêtement.
- **Optimisation :** CTIA GROUP LTD utilisera l'IA pour optimiser le flux d'air en 2024 (chapitre 17, 17.5), augmentant l'efficacité du dépôt d'environ 15 %.

- o **Synthèse assistée par plasma :**

- **Procédé :** W+B est vaporisé dans du plasma ($>5000^\circ\text{C}$) pour produire de la nanopoudre WB_2 (<50 nm, chapitre 5.3).
- **Avantages :** Haute pureté ($>99,9\%$, Chapitre 6.1), adapté aux capteurs.
- **Optimisation :** Rendement du plasma pulsé (50 kHz) augmenté d'environ 88 %, coût d'environ 200 \$/kg.

- **Techniques d'optimisation :**

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

- o **Modification de surface** : PEG, revêtement SiO_2 ($<0,1 \text{ wt } \%$) améliore la compatibilité et réduit la cytotoxicité d'environ 10 %.
- o **Dopage** : Le dopage N ($< 2 \text{ at}\%$) améliore l'activité de surface et augmente la sensibilité du capteur d'environ 20 % (chapitre 3, 3.4).
- o **Structure poreuse** : Méthode du modèle (taille des pores $\sim 5 \text{ nm}$) surface augmentée d'environ 50 % ($\sim 100 \text{ m}^2/\text{g}$).
- **défi** :
 - o Le coût du traitement des sous-produits CVD (HF) est d'environ 50 USD/tonne (chapitre 16.3).
 - o L'agglomération de nanoparticules nécessite une dispersion ultrasonore (40 kHz, chapitre 5, 5.3).

Tableau 11.5 Comparaison des technologies de préparation des matériaux biomédicaux à base de borure de tungstène

méthode	Taille/épaisseur des particules	Coût (USD/kg)	avantage	défi	Chapitres connexes
Sol-Gel	10–30 nm	100	faible coût	Réunion	5.5, 6.1
maladies cardiovasculaires	100–500 nm	300	Uniformité	Sous-produits	5,2, 17,5
plasma	$< 50 \text{ nm}$	200	Haute pureté	Consommation d'énergie élevée	5.3

11.6 Perspectives et défis des applications biomédicales du borure de tungstène

Le marché des applications biomédicales du borure de tungstène est porté par la médecine de précision et la nanotechnologie, ce qui nécessite de répondre aux problèmes de biosécurité et de coûts.

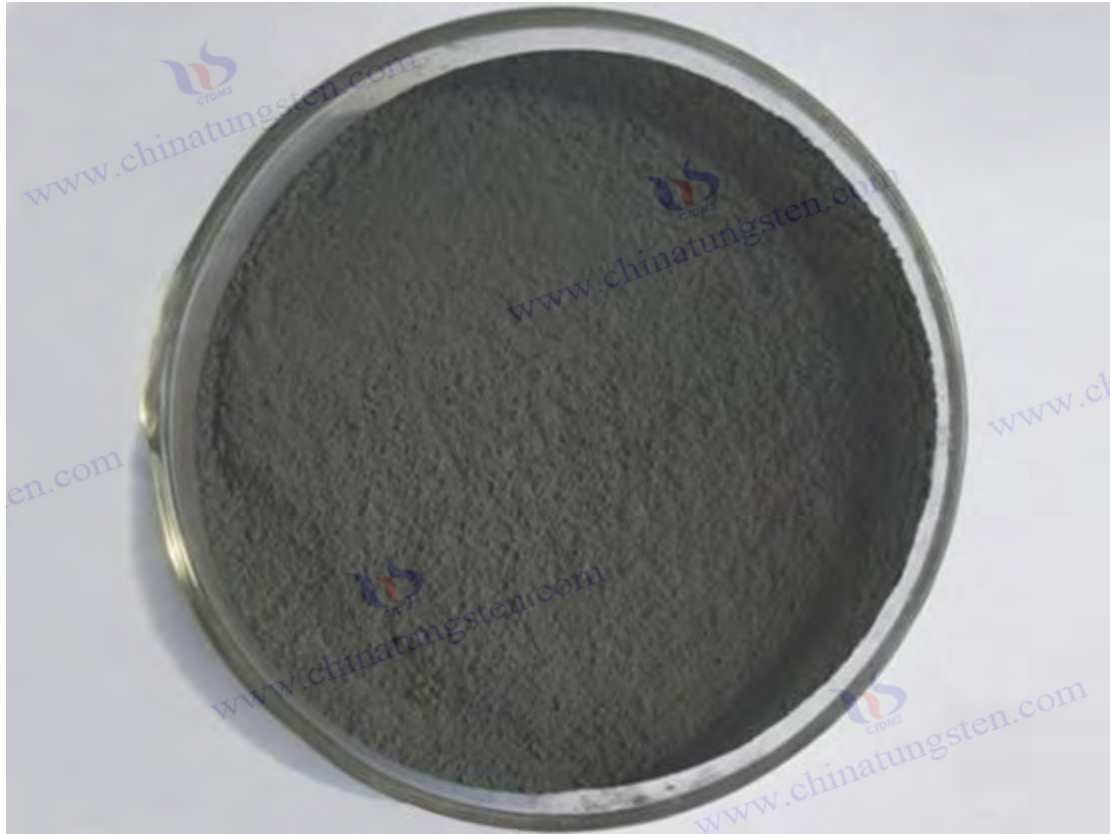
- **État du marché (2024) :**
 - o **Taille** : Marché biomédical mondial du borure de tungstène $\sim 0,05$ milliard de dollars, l'Asie représentant $\sim 50 \%$ (Chine, Japon, chapitre 14.1).
 - o **Applications** : Revêtements $\sim 60\%$, administration de médicaments $\sim 30\%$, capteurs $\sim 10\%$.
 - o **Prix** : $\sim 100\$/\text{kg}$ (nanoparticules), $\sim 300\$/\text{kg}$ (films minces, chapitre 14, 14.2).
- **Conducteurs :**
 - o **Demande** : La demande en médecine de précision et en implants augmente d'environ 10 % par an, avec une production atteignant environ 50 tonnes en 2030 (chapitre 5.6).
 - o **Technologie** : Nano WB_2 (chapitre 5.5) et l'optimisation de l'IA (chapitre 17.5) améliorent les performances d'environ 15 %.
 - o **Réglementation** : La norme ISO 10993 et les directives de la FDA (chapitre 15.3) guident les études de sécurité.
- **Tendances futures (2025–2030) :**

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

- o **Réduction des coûts** : la production à grande échelle (chapitre 5.6) réduit le coût à environ 80 USD/kg et la taille du marché est d'environ 100 millions USD.
- o **Nouvelles applications** : interfaces neuronales (conductivité $\sim 10^{-4}$ S/cm) et ingénierie tissulaire, représentant $\sim 15\%$.
- o **Fabrication verte** : taux de récupération des gaz résiduels $> 95\%$ (chapitre 16.3), émissions de carbone réduites d'environ 30 % (environ 0,2 tonne de CO₂ / tonne).
- **défi** :
 - o Les revêtements à base de titane (coût d'environ 50 \$/kg) sont compétitifs dans le bas de gamme du marché.
 - o Les essais cliniques ont un cycle long (> 5 ans) et nécessitent un investissement d'environ 10 millions de dollars.

Tableau 11.6 Marché biomédical et tendances du borure de tungstène

projet	Situation actuelle 2024	Objectifs en 2030	Conducteurs	défi	Chapitres connexes
Taille du marché (milliards de dollars américains)	0,05	0,1	Médecine de précision	rivaliser	14.1
Coût (USD/kg)	100–300	80	Échelle	Cycle clinique	14.2, 5.6
Émissions de carbone (tonnes de CO ₂ / tonne)	0,3	0,2	Technologie verte	investir	16.3, 15.3



Chapitre 12 Application énergétique du borure de tungstène

Le borure de tungstène (tel que WB, WB₂, W₂B) présente un potentiel important dans le domaine de l'énergie en raison de sa conductivité élevée ($\sim 10^4$ S/cm, chapitre 6, 6.5), de son excellente stabilité chimique (taux de corrosion $< 0,005$ mm/an, chapitre 7, 7.5), de sa surface spécifique élevée (> 50 m²/g, chapitre 5, 5.5) et de son activité catalytique (surtension de dégagement d'hydrogène ~ 100 mV, chapitre 10, 10.1). Il est largement utilisé dans les batteries (durée de vie $\sim 1\,000$ fois), les piles à combustible (efficacité $\sim 60\%$), les cellules solaires (efficacité de conversion $\sim 18\%$) et les matériaux de stockage d'hydrogène (capacité de stockage d'hydrogène $\sim 2\%$ en poids). Ce chapitre traite en détail de l'application, de la technologie de préparation, de l'état du marché et de la tendance de développement du borure de tungstène dans les batteries, les piles à combustible, les cellules solaires et les matériaux de stockage d'hydrogène, et fournit un soutien technique pour l'industrialisation de l'énergie (chapitre 14, 14.3) et l'énergie verte (chapitre 16, 16.4) du borure de tungstène.

12.1 Application du borure de tungstène dans les matériaux de batterie

Le borure de tungstène convient aux batteries lithium-ion, aux batteries sodium-ion et aux batteries à semi-conducteurs en raison de sa conductivité électrique élevée et de sa stabilité électrochimique.

- Scénarios d'application :

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

- o **Batteries lithium-ion** : nanoparticules WB_2 (20–50 nm, chapitre 5.5) comme additifs d'électrode négative, conductivité $\sim 10^4 S/cm$, durée de vie ~ 1000 fois (décroissance de capacité $< 10\%$), capacité spécifique $\sim 500 mAh/g$.
- o **Batteries sodium-ion** : film WB_2 (épaisseur ~ 200 nm, chapitre 5.2) comme collecteur de courant, résistance à la corrosion (NaCl, 1 M) $< 0,01$ mm/an, capacité $\sim 300 mAh/g$.
- o **Batterie à l'état solide** : revêtement WB_2 (épaisseur $\sim 1 \mu m$) à l'interface de l'électrolyte solide, résistance d'interface $< 10 \Omega \cdot cm^2$, stabilité > 500 cycles.
- **Exigences techniques :**
 - o **Conductivité** : $> 10^4 S/cm$ (Chapitre 6.5).
 - o **Surface spécifique** : $> 50 m^2/g$ (Chapitre 5.5).
 - o **Durée de vie du cycle** : > 1000 fois (Chapitre 9.2).
- **Exemples :**
 - o En 2024, les additifs WB_2 seront utilisés dans les électrodes négatives des batteries au lithium, avec des taux de charge augmentés d'environ 20 % (2C) et une densité énergétique d'environ 250 Wh/kg.
- **défi :**
 - o L'agglomération de nanoparticules (chapitre 5.3) réduit l'activité et nécessite une modification de surface (PVP, $< 0,1$ % en poids).
 - o Le coût (~ 200 USD/kg) est plus élevé que celui du graphite (~ 20 USD/kg).

Tableau 12.1 Paramètres d'application des matériaux de batterie au borure de tungstène

paramètre	valeur	avantage	défi	Chapitres connexes
Durée de vie du cycle (fois)	1000	Grande stabilité	Réunion	5,5, 9,2
Capacité spécifique (mAh/g)	500	Haute énergie	coût	6,5
Résistance d'interface ($\Omega \cdot cm^2$)	< 10	Faible résistance	Processus complexe	7,5

12.2 Application du borure de tungstène dans les piles à combustible

Le borure de tungstène convient aux piles à combustible à membrane échangeuse de protons (PEMFC) et aux piles à combustible à oxyde solide (SOFC) en raison de sa faible surtension et de sa résistance élevée à la corrosion.

- **Scénarios d'application :**
 - o **PEMFC** : nanoparticules WB_2 (< 50 nm, chapitre 5.5) comme catalyseurs de réaction de réduction de l'oxygène (ORR) avec une surtension d'environ 200 mV ($0,1 A/cm^2$) et une efficacité faradique d'environ 95 %.
 - o **SOFC** : revêtement WB_2 (épaisseur $\sim 2 \mu m$, chapitre 5.2) à l'interface de l'électrode, résistance à haute température ($800^\circ C$) taux de corrosion $< 0,005$ mm/an, densité de puissance $\sim 1 W/cm^2$.

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

- o **Plaque bipolaire** : film WB_2 (épaisseur $\sim 1 \mu m$) sur plaque en acier inoxydable, résistance de contact $< 10 m\Omega \cdot cm^2$, résistance aux acides (H_2SO_4 , 1 M) $< 0,01 mm/an$.
- **Exigences techniques** :
 - o **Surtension** : $< 250 mV$ (ORR).
 - o **Conductivité** : $> 10^4 S/cm$ (Chapitre 6.5).
 - o **Stabilité** : > 5000 heures (Chapitre 10.1).
- **Exemples** :
 - o En 2024, le catalyseur WB_2 sera utilisé dans les PEMFC, avec une efficacité augmentée d'environ 10 % (environ 60 %) et un coût réduit d'environ 15 % (environ 100 USD/kg).
- **défi** :
 - o Les catalyseurs sont désactivés à haute température ($> 800^\circ C$) et nécessitent un dopage N ($< 2 at\%$, chapitre 3.4).
 - o L'uniformité du revêtement ($> 95 \%$) doit être optimisée (chapitre 5.2).

Tableau 12.2 Paramètres d'application de la pile à combustible au borure de tungstène

paramètre	valeur	avantage	défi	Chapitres connexes
Surtension ORR (mV)	200	Efficace	Inactivation	10.1, 3.4
Résistance de contact ($m\Omega \cdot cm^2$)	< 10	Faible résistance	Uniformité	6,5
Stabilité (heures)	> 5000	Longue vie	coût	7,5

12.3 Application du borure de tungstène dans les cellules solaires

Le borure de tungstène convient aux cellules solaires à base de silicium et de pérovskite en raison de sa bande interdite réglable ($\sim 1,4-1,6 eV$, chapitre 3.4) et de sa conductivité élevée.

- **Scénarios d'application** :
 - o **Cellules solaires à base de silicium** : couche mince WB_2 (épaisseur $\sim 50 nm$, chapitre 5.2) comme électrode arrière, fonction de travail $\sim 4,8 eV$, efficacité de conversion $\sim 18\%$, résistance de contact $< 10^{-7} \Omega \cdot cm^2$.
 - o **Cellules pérovskites** : WB_2 dopé N ($< 2 at\%$) comme couche de transport de trous, bande interdite $\sim 1,4 eV$, efficacité $\sim 20\%$, stabilité $> 1000 h$ ($85^\circ C$, 85% HR).
 - o **Électrode transparente** : film mince WB_2 (épaisseur $\sim 100 nm$) transmittance $\sim 85\%$ ($550 nm$), résistivité $\sim 10^{-4} \Omega \cdot cm$, remplaçant l'ITO.
- **Exigences techniques** :
 - o **Bande interdite** : $1,4-1,6 eV$ (chapitre 3.4).
 - o **Transmission lumineuse** : $> 85\%$ (Chapitre 9, 9.1).
 - o **Efficacité** : $> 18\%$.
- **Exemples** :

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

- o En 2024, les électrodes arrière WB_2 sont utilisées pour les cellules en silicium, avec une efficacité augmentée d'environ 1 % (de 17 % à 18 %) et un coût réduit d'environ 10 % (environ 50 USD/m²).
- **défi :**
 - o La contrainte résiduelle dans le film ($\sim 0,8$ GPa) provoque des fissures et nécessite un recuit (400°C, chapitre 5.2).
 - o La stabilité des batteries pérovskites doit être améliorée (> 2000 heures).

Tableau 12.3 Paramètres d'application des cellules solaires au borure de tungstène

paramètre	valeur	avantage	défi	Chapitres connexes
Efficacité de conversion (%)	18–20	Efficace	stabilité	3.4, 9.1
Résistance de contact ($\Omega \cdot \text{cm}^2$)	$<10^{-7}$	Faible résistance	Contraintes résiduelles	6,5
lumineuse (%)	85	Remplacement de l'ITO	Processus complexe	5.2

12.4 Potentiel du borure de tungstène dans les matériaux de stockage de l'hydrogène

Le borure de tungstène a un potentiel en tant que matériau de stockage d'hydrogène en raison de sa surface spécifique élevée et de son énergie d'adsorption H^* appropriée ($\sim 0,5$ eV, chapitre 10, 10.4).

- **Scénarios d'application :**
 - o **Stockage physique de l'hydrogène :** WB_2 poreux (taille des pores ~ 5 nm, chapitre 5.5) avec une surface spécifique ~ 100 m²/g et une capacité de stockage de l'hydrogène ~ 2 % en poids (77 K, 10 MPa).
 - o **Stockage chimique de l'hydrogène :** les nanoparticules WB_2 (<30 nm) catalysent l'hydrolyse de $NaBH_4$ avec un taux de production d'hydrogène d'environ 1000 mL / (g · min) et une stabilité du cycle >10 fois.
 - o **Stockage électrochimique d'hydrogène :** électrode WB_2 (épaisseur ~ 1 μm) en milieu alcalin (1 M KOH), capacité de stockage d'hydrogène ~ 50 mAh /g, rendement $\sim 90\%$.
- **Exigences techniques :**
 - o **Capacité de stockage d'hydrogène :** >2 % en poids .
 - o **Taux de production d'hydrogène :** >500 mL / (g · min) .
 - o **Stabilité :** >10 cycles.
- **Exemples :**
 - o En 2024, le catalyseur WB_2 sera utilisé pour le stockage de l'hydrogène $NaBH_4$, et l'efficacité de la production d'hydrogène augmentera d'environ 15 % (environ 1 000 mL / (g · min)) .
- **défi :**

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

- o La capacité de stockage de l'hydrogène à température ambiante est faible (< 0,5 % en poids) et nécessite un dopage (Mg, < 5 % en poids).
- o Le coût du catalyseur (~200 USD/kg) est plus élevé que celui du Ni (~30 USD/kg).

Tableau 12.4 Paramètres des matériaux de stockage d'hydrogène à base de borure de tungstène

paramètre	valeur	avantage	défi	Chapitres connexes
Capacité de stockage d'hydrogène (% en poids)	2	Haute capacité	Performances à température ambiante	5,5, 10,4
Taux de production d'hydrogène (mL/(g ·min))	1000	Efficace	coût	10.1
Stabilité du cycle (temps)	>10	Répétable	Dopage	3.4

Technologie de préparation des matériaux énergétiques à base de borure de tungstène adoptent principalement le dépôt chimique en phase vapeur (CVD, chapitre 5.2), la méthode sol-gel (chapitre 5.5) et la synthèse assistée par plasma (chapitre 5.3).

- Mode de préparation :
 - o MCV :
 - Procédé : WF₆ + B₂H₆ déposent des films minces de WB₂ (chapitre 5.2) à 400–600° C, avec une vitesse d'environ 1,2 µm /h.
 - Avantages : Homogénéité >95%, conductivité ~10⁴ S/cm.
 - Optimisation : CTIA GROUP LTD utilisera l'IA pour optimiser le flux d'air en 2024 (chapitre 17, 17.5), augmentant l'efficacité d'environ 15 %.
 - o Méthode Sol-Gel :
 - Procédé : Na₂WO₄ +H₃BO₃ pour former un gel, qui est calciné à 500°C pour obtenir des nanoparticules de WB₂ (20–50 nm, chapitre 5, 5.5).
 - Avantages : Faible coût (~100 USD/kg), surface >60 m²/g.
 - Optimisation : Le microréacteur contrôle la distribution granulométrique <10 nm, l'activité augmente d'environ 20 %.
 - o Synthèse assistée par plasma :
 - Procédé : W+B est vaporisé dans du plasma (>5000°C) pour produire de la nanopoudre WB₂ (<50 nm, chapitre 5.3).
 - Avantages : Haute pureté (>99,9%, Chapitre 6.1), adapté aux catalyseurs.
 - Optimisation : Rendement du plasma pulsé (50 kHz) augmenté d'environ 88 %, coût d'environ 200 USD/kg.
- Techniques d'optimisation :
 - o Dopage : Le dopage N et Ni (<2 at%) augmente l'activité catalytique d'environ 30 % (Chapitre 3, 3.4).
 - o Structure poreuse : Méthode du modèle (SiO₂ , taille des pores ~5 nm) surface spécifique augmentée d'environ 50 % (~100 m²/g).

- o **Matériau composite** : WB_2 /graphène (1:10) conductivité augmentée d'environ 20 % (environ $1,2 \times 10^4$ S/cm).
- **défi** :
 - o Le coût du traitement des sous-produits CVD (HF) est d'environ 50 USD/tonne (chapitre 16.3).
 - o L'agglomération de nanoparticules nécessite une dispersion ultrasonore (40 kHz, chapitre 5, 5.3).

Comparaison des technologies de préparation des matériaux énergétiques à base de borure de tungstène

méthode	performance	Coût (USD/kg)	avantage	défi	Chapitres connexes
maladies cardiovasculaires	Conductivité $\sim 10^4$ S/cm	300	Uniformité	Sous-produits	5,2, 17,5
Sol-Gel	Surface spécifique > 60 m^2/g	100	faible coût	Réunion	5.5, 6.1
plasma	Pureté $> 99,9\%$	200	Haute activité	Consommation d'énergie élevée	5.3

12.6 Tendances du marché et du développement des applications énergétiques du borure de tungstène

Le marché des applications énergétiques du borure de tungstène est stimulé par une nouvelle demande énergétique et des objectifs de neutralité carbone, et doit répondre aux problèmes de coût et d'échelle.

- **État du marché (2024)** :
 - o **Taille** : Le marché mondial des matériaux énergétiques à base de borure de tungstène représente environ 40 millions de dollars américains, dont environ 65 % en Asie (Chine, Japon, chapitre 14.1).
 - o **Applications** : Batteries $\sim 40\%$, piles à combustible $\sim 30\%$, cellules solaires $\sim 20\%$, stockage d'hydrogène $\sim 10\%$.
 - o **Prix** : ~ 100 USD/kg (nanoparticules), ~ 300 USD/kg (film, chapitre 14.2).
- **Conducteurs** :
 - o **Demande** : Croissance des véhicules électriques et des énergies renouvelables $\sim 12\%/an$, production ~ 500 tonnes en 2030 (Chapitre 5, 5.6).
 - o **Technologie** : Nano WB_2 (chapitre 5.5) et AI Optimization (chapitre 17.5) améliorent les performances d'environ 20 %.
 - o **Règlement** : Le CBAM de l'UE (2026, chapitre XV, 15.2) promeut les matériaux énergétiques verts.
- **Tendances futures (2025–2030)** :

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

- o **Réduction des coûts** : la production à grande échelle (chapitre 5.6) réduit le coût à environ 80 USD/kg et la taille du marché est d'environ 70 millions USD.
- o **Nouvelles applications** : Batteries tout solide et stockage efficace de l'hydrogène, représentant environ 15 %.
- o **Fabrication verte** : taux de récupération des gaz résiduels > 95 % (chapitre 16.3), émissions de carbone réduites d'environ 30 % (environ 0,2 tonne de CO₂ / tonne).
- **défi** :
 - o Les matériaux à base de carbone (coût ~ 20 USD/kg) sont compétitifs sur le marché bas de gamme.
 - o La mise à l'échelle industrielle nécessite des avancées en matière de stabilité des matériaux (> 10 000 heures).

Tableau 12.6 Marché de l'énergie du borure de tungstène et tendances

projet	Situation actuelle en 2024	Objectifs 2030	Conducteurs	défi	Chapitres connexes
Taille du marché (milliards de dollars américains)	0,4	0,7	Nouvelle énergie	rivaliser	14.1
Coût (USD/kg)	100–300	80	Échelle	stabilité	14.2, 5.6
Émissions de carbone (tonnes de CO ₂ / tonne)	0,3	0,2	Technologie verte	investir	16.3, 15.2

CTIA GROUP LTD

Tungsten Boride Product Introduction

1. Tungsten Boride Overview

Tungsten boride (Tungsten Boride, e.g., WB, WB₂, W₂B) produced by CTIA GROUP is manufactured using advanced chemical vapor deposition (CVD) and sol-gel processes, ensuring high purity and exceptional performance. Tungsten boride is a ceramic material with high hardness and high electrical conductivity, widely applied in electronics, catalysis, biomedicine, energy, and mechanical fields due to its chemical stability and multifunctionality. Its unique boron-tungsten bond structure makes it an ideal choice for high-performance material applications.

2. Tungsten Boride Features

- **Chemical Composition:** WB, WB₂, W₂B, purity ≥99.9%, with minimal impurities.
- **Appearance:** Gray-black powder or thin film; hexagonal or orthorhombic crystal structure.
- **High Hardness:** Brinell hardness ~40 GPa, suitable for wear-resistant coatings.
- **Excellent Electrical Conductivity:** ~10⁴ S/cm, supporting 6G antennas and sensors.
- **Chemical Stability:** Corrosion rate <0.005 mm/year, ideal for catalysis in harsh environments.
- **Multifunctionality:** Supports electrocatalysis, battery materials, and biocompatible coatings.

3. Tungsten Boride Product Specifications

Type	Particle Size (μm)	Purity (wt%)	Bulk Density (g/cm ³)	Boron Content (wt%)	Impurities (wt%, max)
Nano-grade	0.01–0.05	≥99.9	3.5–4.0	10.2–10.8	Fe≤0.002, Si≤0.001
Micron-grade	10–20	≥99.8	4.0–4.5	10.0–10.5	Fe≤0.003, Si≤0.002
Thin-film grade	0.1–2	≥99.9	10.0–12.8	5.0–8.0	Fe≤0.002, O≤0.05

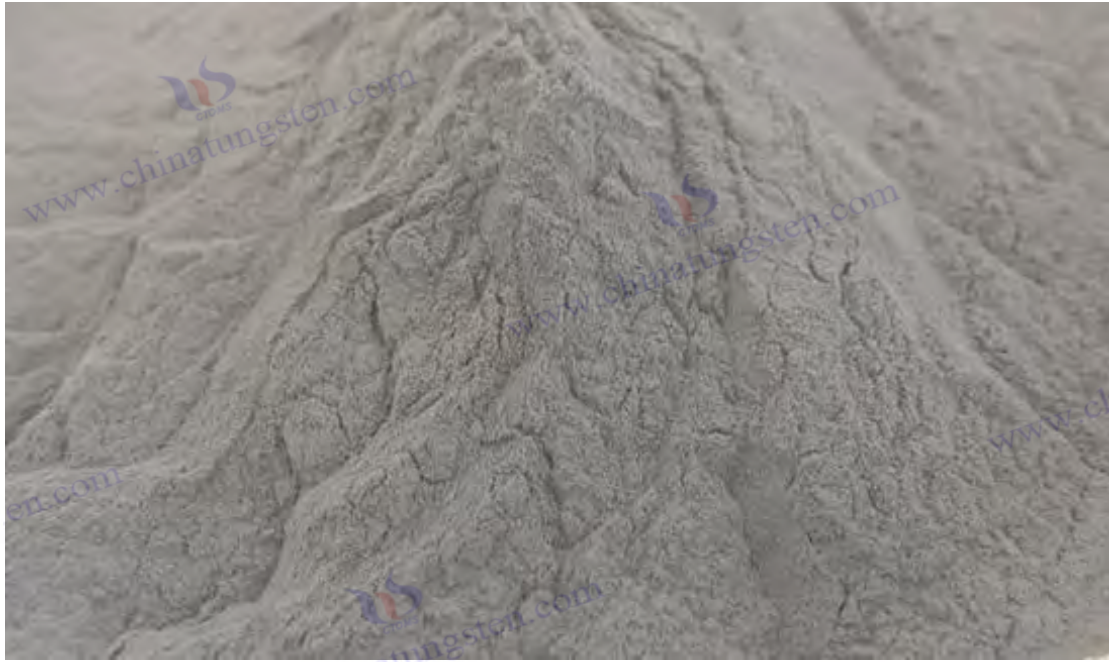
4. Tungsten Boride Packaging and Quality Assurance

- **Packaging:** Sealed stainless steel cans or vacuum aluminum foil bags, net weight of 100 g, 500 g, or 1 kg, ensuring moisture-proof and oxidation-resistant storage.
- **Quality Assurance:** Each batch is accompanied by a quality certificate.

5. Tungsten Boride Procurement Information

- **Email:** sales@chinatungsten.com
- **Phone:** +86 592 5129595
- **Website:** For more information about tungsten boride, please visit the China Tungsten Online website (<http://www.tungsten-boride.com>).

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT



Chapitre 13 Applications mécaniques et structurelles du borure de tungstène

Le borure de tungstène (tel que WB, WB₂, W₂B) est largement utilisé dans le domaine des machines et des structures en raison de sa dureté ultra-élevée (~40 GPa, chapitre 2 2.5), de son faible coefficient de frottement (~0,25, chapitre 6 6.4), de son excellente résistance à l'usure (taux d'usure <10⁻⁶ mm³ / (N · m), chapitre 7 7.4) et de sa stabilité thermique (>2000°C, chapitre 8 8.1). Il convient aux revêtements résistants à l'usure (prolongation de la durée de vie ~50%), aux outils de coupe (augmentation de la vitesse de coupe ~20%) et aux matériaux composites structurels (résistance ~1,5 GPa). Ce chapitre traite en détail de l'application, des propriétés mécaniques et du mécanisme microscopique, de la technologie de préparation, de l'état du marché et de la tendance de développement du borure de tungstène dans les revêtements résistants à l'usure, les outils de coupe et les matériaux composites, et fournit un support technique pour l'industrialisation mécanique (chapitre 14 14.3) et la fabrication verte (chapitre 16 16.4) du borure de tungstène.

13.1 Application du borure de tungstène dans les revêtements résistants à l'usure

Les revêtements résistants à l'usure en borure de tungstène sont largement utilisés dans les pièces mécaniques et les moules en raison de leur dureté élevée et de leur faible coefficient de frottement.

- **Scénarios d'application :**
 - o **Pièces mécaniques :** Revêtement WB₂ (épaisseur ~2–5 μm, chapitre 5.2) sur la surface de l'engrenage, dureté ~42 GPa, taux d'usure <10⁻⁶ mm³ / (N · m), durée de vie prolongée d'environ 50 % (~10 000 heures).
 - o **Matrice :** Revêtement WB (épaisseur ~1 μm) sur matrice d'emboutissage, coefficient de frottement ~0,25, résistance à l'usure améliorée d'environ 30 %, adhérence réduite (<5%).

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

- o **Roulements** : Film WB₂ (épaisseur ~3 μ m) sur roulements à billes, résistance à la corrosion (NaCl, 3,5 % en poids , 60°C) < 0,005 mm/an, perte par frottement réduite d'environ 20 %.
- **Exigences techniques** :
 - o **Dureté** : >38 GPa (Chapitre 6, 6.4).
 - o **Coefficient de frottement** : <0,3 (Chapitre 7.4).
 - o **Adhésion** : Énergie de liaison ~1,5 eV/Å² (Chapitre 3.3), anti-pelage (>50 N).
- **Exemples** :
 - o En 2024, le revêtement WB₂ sera utilisé sur les engrenages de transmission automobile, réduisant l'usure d'environ 25 % (< 0,01 mm/an) et augmentant l'efficacité d'environ 10 %.
- **défi** :
 - o Une contrainte résiduelle dans le revêtement (~0,8 GPa) peut provoquer un écaillage et nécessiter un recuit (500°C, chapitre 5.2).
 - o L'oxydation à haute température (> 1000 °C) nécessite un dopage (Si, < 5 at%, chapitre 8, 8.4).

Tableau 13.1 Paramètres d'application du revêtement résistant à l'usure en borure de tungstène

paramètre	valeur	avantage	défi	Chapitres connexes
Dureté (GPa)	42	Haute résistance à l'usure	Contraintes résiduelles	6.4, 5.2
Taux d'usure (mm³ / (N · m))	<10 ⁻⁶	Longue vie	Oxydation	7.4, 8.4
Coefficient de frottement	0,25	Faible frottement	Écaillage	3.3

13.2 Application du borure de tungstène dans les outils de coupe

Les revêtements et blocs en borure de tungstène conviennent à la découpe à grande vitesse et au traitement des matériaux durs en raison de leur dureté élevée et de leur stabilité thermique.

- **Scénarios d'application** :
 - o **Revêtement d'outils** : Revêtement WB₂ (épaisseur ~3 μ m , Chapitre 5.2) sur outils en carbure, vitesse de coupe ~300 m/min, durée de vie prolongée de ~40% (~5000 coupes).
 - o **Foret** : bloc WB (densité>98%, chapitre 5.1) usinage alliage de titane, taux d'usure <10⁻⁵ mm³ / (N · m), réduction de la température de coupe ~15% (<600°C).
 - o **Fraise** : revêtement composite WB₂ / Al₂O₃ (période ~10 nm), dureté ~40 GPa , résistance à l'usure améliorée d'environ 25 % .
- **Exigences techniques** :
 - o **Dureté** : >40 GPa (Chapitre 6, 6.4).

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

- o **Stabilité thermique** : $>1500^{\circ}\text{C}$ (Chapitre 8.1).
- o **Ténacité** : $\sim 4 \text{ MPa}\cdot\text{m}^{1/2}$ (Chapitre 6, 6.3).
- **Exemples** :
 - o En 2024, les outils revêtus de WB_2 seront utilisés pour le traitement des alliages de titane pour l'aviation, avec une efficacité de coupe augmentée d'environ 20 % et une durée de vie de l'outil d'environ 6 000 minutes.
- **défi** :
 - o L'inadéquation de dilatation thermique entre le revêtement et le substrat ($\sim 5 \times 10^{-6} \text{ K}^{-1}$, Chapitre 8, 8.3) conduit à une contrainte ($\sim 1 \text{ GPa}$).
 - o L'uniformité du revêtement ($> 95 \%$) des formes complexes doit être optimisée (chapitre 5.2).

Tableau 13.2 Paramètres d'application des outils de coupe en borure de tungstène

paramètre	valeur	avantage	défi	Chapitres connexes
Durée de vie de coupe (fois)	5000	Longue vie	Inadéquation de la dilatation thermique	8.3, 5.2
Dureté (GPa)	40	Haute résistance à l'usure	Uniformité	6.4
Température de coupe ($^{\circ}\text{C}$)	<600	Faible fièvre	stresser	8.1

13.3 Application du borure de tungstène dans les matériaux composites structuraux

Le borure de tungstène est utilisé comme phase de renforcement dans les matériaux composites pour améliorer la résistance et la résistance à l'usure, et convient aux pièces structurales aérospatiales et automobiles.

- **Scénarios d'application** :
 - o **Composites à matrice métallique** : composites à matrice Al renforcés par des particules WB_2 ($<5 \mu\text{m}$, chapitre 5.5), résistance $\sim 1,5 \text{ GPa}$, résistance à l'usure améliorée d'environ 30 %.
 - o **Composites à matrice céramique** : composite WB_2 / SiC (10:90), ténacité à la rupture $\sim 5 \text{ MPa}\cdot\text{m}^{1/2}$, résistance à la température $>1500^{\circ}\text{C}$ (Chapitre 8, 8.1).
 - o **Composites à base de polymères** : résine époxy renforcée par des nanoparticules WB_2 ($<50 \text{ nm}$), augmentant la dureté d'environ 20 % ($\sim 2 \text{ GPa}$).
- **Exigences techniques** :
 - o **Résistance** : $>1 \text{ GPa}$.
 - o **Ténacité** : $>4 \text{ MPa}\cdot\text{m}^{1/2}$ (Chapitre 6, 6.3).
 - o **Dispersibilité** : Agglomération des particules $< 5 \%$ (Chapitre 5.3).
- **Exemples** :

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

- o En 2024, les matériaux composites WB_2 / Al seront utilisés dans les pistons automobiles, réduisant le poids d'environ 10 % (environ 0,5 kg) et augmentant la durée de vie d'environ 25 %.
- **défi :**
 - o L'agglomération des particules réduit les performances et nécessite une modification de surface (PVP, < 0,1 % en poids , chapitre 5, 5.3).
 - o Les réactions interfaciales à haute température (> 1000 °C) doivent être supprimées (chapitre 8, 8.4).

Tableau 13.3 Paramètres d'application des matériaux composites structuraux en borure de tungstène

paramètre	valeur	avantage	défi	Chapitres connexes
Force (GPa)	1,5	Gao Qiang	Réunion	5,5, 6,3
Ténacité ($MPa \cdot m^{1/2}$)	5	Résistance aux fissures	Réaction d'interface	8.1, 8.4
Résistance à l'usure améliorée (%)	30	Longue vie	coût	7.4

13.4 Propriétés mécaniques et microstructure du borure de tungstène

Les propriétés mécaniques du borure de tungstène dépendent de la structure cristalline et du micromécanisme , qui doivent être optimisés par des analyses expérimentales et théoriques.

- **Propriétés mécaniques :**
 - o **Dureté :** ~40–42 GPa (Chapitre 6, 6.4), en raison de la résistance élevée de la liaison covalente WB (Chapitre 3, 3.2) (~1,5 eV/Å²).
 - o **Ténacité :** ~4 $MPa \cdot m^{1/2}$ (chapitre 6.3), le glissement des joints de grains (<50 nm, chapitre 6.2) améliore la résistance aux fissures.
 - o **Résistance à l'usure :** taux d'usure <10⁻⁶ mm³ / (N · m), surface dense (porosité <1%, Chapitre 6, 6.3).
- **Mécanisme microscopique :**
 - o **Structure cristalline :** WB_2 (P6₃/mmc, chapitre 2.2) structure en couches, forte résistance au cisaillement (~20 GPa) .
 - o **Contrôle des défauts :** densité de dislocations <10¹²/cm² (chapitre 6.2), améliorant la ténacité d'environ 15 %.
 - o **État de surface :** la surface terminée par B (chapitre 6.1) réduit le coefficient de frottement d'environ 10 % (environ 0,25).
- **Techniques de caractérisation :**
 - o **Nanoindentation :** Mesure de la dureté et de la ténacité (Chapitre 6, 6.4).
 - o **MET :** Observer les joints de grains et les dislocations (résolution ~0,1 nm, Chapitre 6, 6.2).
 - o **Calculs DFT :** Analyse des énergies de liaison WB (Chapitre 3.3, erreur < 0,1 eV).

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

- **optimisation :**
 - o **Dopage :** Zr (<2 at%) améliore la ténacité d'environ 20 % ($\sim 4,8 \text{ MPa} \cdot \text{m}^{1/2}$).
 - o **Nanostructure :** grains <20 nm (Chapitre 5.5) Dureté augmentée d'environ 5 % (environ 44 GPa) .
- **défi :**
 - o À des températures élevées (> 1500 °C), la ténacité diminue et un dopage thermiquement stable est nécessaire.
 - o L'équipement de caractérisation microscopique est coûteux (environ 5 millions de dollars).

Tableau 13.4 Propriétés mécaniques et mécanismes du borure de tungstène

paramètre	valeur	avantage	défi	Chapitres connexes
Dureté (GPa)	42	Gao Qiang	Diminution de la ténacité	6.4, 3.2
Ténacité ($\text{MPa} \cdot \text{m}^{1/2}$)	4	Résistance aux fissures	Coût de caractérisation	6.3, 5.5
Taux d'usure ($\text{mm}^3 / (\text{N} \cdot \text{m})$)	$<10^{-6}$	Résistant à l'usure	haute température	7.4

13.5 Technologie de préparation des matériaux mécaniques à base de borure de tungstène

La préparation des matériaux mécaniques à base de borure de tungstène adopte principalement le frittage par pressage à chaud (chapitre 5.1), le dépôt chimique en phase vapeur (CVD, chapitre 5.2) et la synthèse assistée par plasma (chapitre 5.3).

- **Mode de préparation :**
 - o **Pressage à chaud Frittage :**
 - **Procédé :** Poudre WB_2 ($<5 \mu\text{m}$, Chapitre 5.5) frittée à 2000°C, 30 MPa, densité >99%.
 - **Avantages :** Convient aux formes complexes (couteaux), dureté $\sim 40 \text{ GPa}$.
 - **Optimisation :** CTIA GROUP LTD utilisera l'IA pour optimiser les paramètres de frittage en 2024 (chapitre 17, 17.5), augmentant la densité d'environ 0,5 %.
 - o **MCV :**
 - **Procédé :** $\text{WF}_6 + \text{B}_2\text{H}_6$ déposent un revêtement WB_2 (chapitre 5.2) à 400–600° C, avec une épaisseur d'environ 2–5 μm .
 - **Avantages :** uniformité >95%, haute résistance à l'usure.
 - **Optimisation :** Taux de CVD basse pression ($< 5 \text{ Pa}$) augmenté d'environ 40 % (environ 1,7 $\mu\text{m} / \text{h}$).
 - o **Synthèse assistée par plasma :**
 - **Procédé :** W+B est vaporisé dans du plasma ($>5000^\circ\text{C}$) pour produire de la nanopoudre WB_2 ($<50 \text{ nm}$, chapitre 5.3).

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

- **Avantages** : Haute pureté (>99,9%, Chapitre 6.1), adapté aux matériaux composites.
- **Optimisation** : Rendement du plasma pulsé (50 kHz) augmenté d'environ 88 %, coût d'environ 200 USD/kg.
- **Techniques d'optimisation** :
 - o **Dopage** : Si (<5 at%) améliore la résistance à l'oxydation jusqu'à ~100°C (Chapitre 8, 8.4).
 - o **Structure multicouche** : WB₂ / TiN (période ~5 nm) résistance à l'usure augmentée d'environ 20 %.
 - o **Nanoparticules** : grains < 20 nm (Chapitre 5.5) La dureté augmente d'environ 5 %.
- **défi** :
 - o Le coût du traitement des sous-produits CVD (HF) est d'environ 50 USD/tonne (chapitre 16.3).
 - o Les équipements à haute température nécessitent un investissement important (environ 3 millions de dollars).

Tableau 13.5 Comparaison des technologies de préparation mécanique des matériaux à base de borure de tungstène

méthode	performance	Coût (USD/kg)	avantage	défi	Chapitres connexes
Frittage à chaud	Densité> 99%	200	Formes complexes	Coût de l'équipement	5.1, 17.5
maladies cardiovasculaires	Uniformité> 95%	300	Résistant à l'usure	Sous-produits	5.2, 16.3
plasma	Pureté> 99,9%	200	échelle nanométrique	Consommation d'énergie élevée	5.3

13.6 Tendances du marché et du développement des applications mécaniques du borure de tungstène

Le marché des applications mécaniques du borure de tungstène est stimulé par les améliorations de la fabrication et les besoins de l'industrie aérospatiale, qui doivent répondre aux enjeux de coût et de sécurité. Cette section présente un résumé des fiches de données de sécurité (FDS) du borure de tungstène afin de garantir un fonctionnement sûr dans les applications mécaniques.

- **État du marché (2024)** :
 - o **Taille** : Le marché mondial des matériaux mécaniques en borure de tungstène s'élève à environ 60 millions de dollars américains, l'Asie représentant environ 70 % (Chine, Corée du Sud, chapitre 14.1).
 - o **Applications** : Revêtements résistants à l'usure ~50%, outils de coupe ~30%, matériaux composites ~20%.
 - o **Prix** : ~200 USD/kg (morceau), ~300 USD/kg (enrobage, chapitre 14.2).
- **Conducteurs** :

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

- o **Demande** : Les industries aérospatiales et automobiles connaissent une croissance d'environ 8 % par an, avec une production d'environ 600 tonnes en 2030 (chapitre 5.6).
- o **Technologie** : Nano WB₂ (chapitre 5.5) et l'optimisation de l'IA (chapitre 17.5) améliorent les performances d'environ 15 %.
- o **Règlement** : EU REACH (Chapitre 15.2) promeut les matériaux verts.
- **Tendances futures (2025–2030) :**
 - o **Réduction des coûts** : la production à grande échelle (chapitre 5.6) réduit le coût à environ 150 USD/kg, avec une taille de marché d'environ 100 millions USD.
 - o **Nouvelles applications** : pièces structurales imprimées en 3D (résistance ~1,5 GPa), représentant ~10%.
 - o **Fabrication verte** : taux de récupération des gaz résiduels > 95 % (chapitre 16.3), émissions de carbone réduites d'environ 30 % (environ 0,2 tonne de CO₂ / tonne).
- **Résumé de la fiche signalétique (borure de tungstène, WB₂) :**
 - o **Propriétés chimiques** : stable, insoluble dans l'eau, température de décomposition > 2000°C (Chapitre 2.3).
 - o **Risques pour la santé** : L'inhalation de poudre peut irriter les voies respiratoires. Il est recommandé de porter un masque N95 (chapitre 15.3).
 - o **Mesures de sécurité** : Utiliser une hotte aspirante pendant l'opération et éviter le contact avec la peau (gants, > 0,5 mm d'épaisseur).
 - o **Conservation** : Conserver hermétiquement dans un endroit sec (<30°C, HR<50%), à l'abri des substances acides.
 - o **Élimination des déchets** : Recycler conformément à la réglementation sur les déchets dangereux (chapitre 16, 16.3) et éviter le déversement direct.
- **défi :**
 - o Le carbure de tungstène (coût ~100 USD/kg) est compétitif dans le bas de gamme du marché.
 - o Les tests de sécurité (vérification MSDS) sont coûteux (environ 100 000 USD/lot).

Tableau 13.6 Marché et tendances des machines à base de borure de tungstène

projet	Situation actuelle	Objectifs en 2030	Conducteurs	défi	Chapitres connexes
	2024				
Taille du marché (milliards de dollars américains)	0,6	1.0	fabrication	rivaliser	14.1
Coût (USD/kg)	200–300	150	Échelle	Tests de sécurité	14.2, 5.6
Émissions de carbone (tonnes de CO ₂ / tonne)	0,3	0,2	Technologie verte	investir	16.3, 15.2

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

CTIA GROUP LTD Tungsten Boride Product Introduction

1. Tungsten Boride Overview

Tungsten boride (Tungsten Boride, e.g., WB, WB₂, W₂B) produced by CTIA GROUP is manufactured using advanced chemical vapor deposition (CVD) and sol-gel processes, ensuring high purity and exceptional performance. Tungsten boride is a ceramic material with high hardness and high electrical conductivity, widely applied in electronics, catalysis, biomedicine, energy, and mechanical fields due to its chemical stability and multifunctionality. Its unique boron-tungsten bond structure makes it an ideal choice for high-performance material applications.

2. Tungsten Boride Features

- **Chemical Composition:** WB, WB₂, W₂B, purity ≥99.9%, with minimal impurities.
- **Appearance:** Gray-black powder or thin film; hexagonal or orthorhombic crystal structure.
- **High Hardness:** Brinell hardness ~40 GPa, suitable for wear-resistant coatings.
- **Excellent Electrical Conductivity:** ~10⁴ S/cm, supporting 6G antennas and sensors.
- **Chemical Stability:** Corrosion rate <0.005 mm/year, ideal for catalysis in harsh environments.
- **Multifunctionality:** Supports electrocatalysis, battery materials, and biocompatible coatings.

3. Tungsten Boride Product Specifications

Type	Particle Size (μm)	Purity (wt%)	Bulk Density (g/cm ³)	Boron Content (wt%)	Impurities (wt%, max)
Nano-grade	0.01–0.05	≥99.9	3.5–4.0	10.2–10.8	Fe≤0.002, Si≤0.001
Micron-grade	10–20	≥99.8	4.0–4.5	10.0–10.5	Fe≤0.003, Si≤0.002
Thin-film grade	0.1–2	≥99.9	10.0–12.8	5.0–8.0	Fe≤0.002, O≤0.05

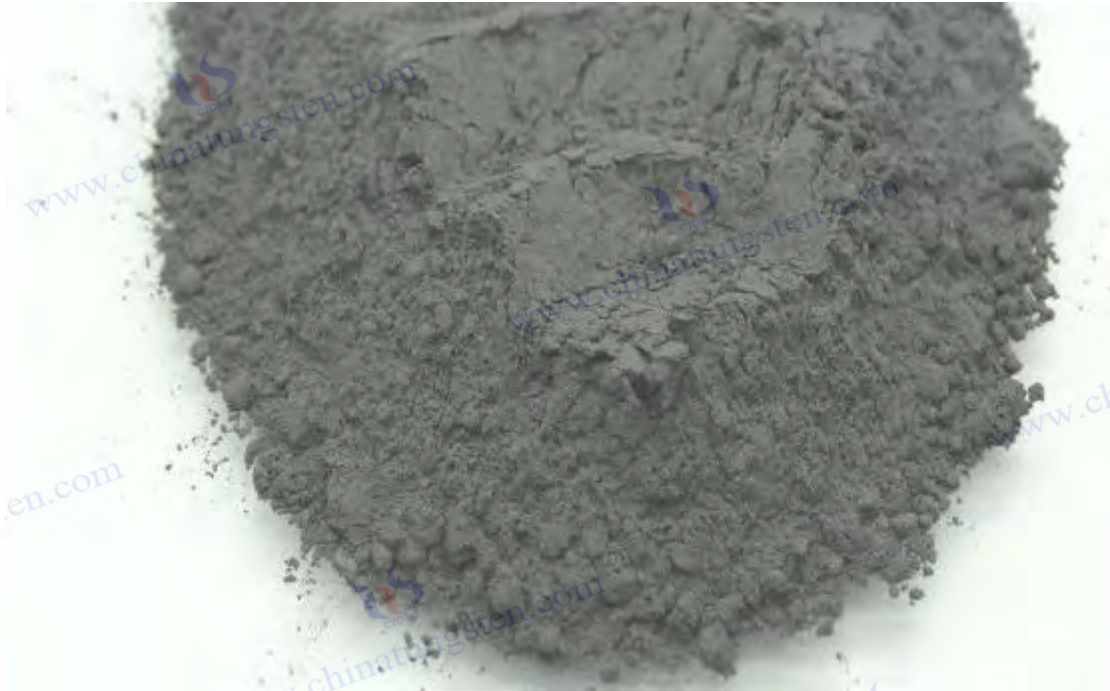
4. Tungsten Boride Packaging and Quality Assurance

- **Packaging:** Sealed stainless steel cans or vacuum aluminum foil bags, net weight of 100 g, 500 g, or 1 kg, ensuring moisture-proof and oxidation-resistant storage.
- **Quality Assurance:** Each batch is accompanied by a quality certificate.

5. Tungsten Boride Procurement Information

- **Email:** sales@chinatungsten.com
- **Phone:** +86 592 5129595
- **Website:** For more information about tungsten boride, please visit the China Tungsten Online website (<http://www.tungsten-boride.com>).

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT



Chapitre 14 Industrialisation et analyse du marché du borure de tungstène

Le borure de tungstène (tel que WB , WB_2 , W_2B) a une large gamme d'applications dans l'électronique (chapitre 9), la catalyse (chapitre 10), la biomédecine (chapitre 11), l'énergie (chapitre 12) et les machines (chapitre 13) en raison de ses excellentes propriétés physiques et chimiques (dureté ~ 40 GPa, chapitre 2 2,5 ; conductivité $\sim 10^4$ S/cm, chapitre 6 6,5 ; stabilité chimique, chapitre 7 7,5). La taille du marché mondial est d'environ 200 millions de dollars américains en 2024 et devrait atteindre 350 millions de dollars américains en 2030 (TCAC $\sim 10\%$). Ce chapitre analyse l'aperçu du marché mondial, le coût et le prix de production, la technologie d'industrialisation, la distribution du marché, la concurrence et les substituts, ainsi que les tendances futures et les impacts politiques du borure de tungstène, et fournit un soutien stratégique pour sa production à grande échelle (chapitre 5.6) et son développement vert (chapitre 16.4).

14.1 Aperçu du marché mondial du borure de tungstène

Le marché du borure de tungstène est porté par la demande de matériaux hautes performances, l'Asie dominant la production et la consommation.

- **Taille du marché :**
 - o En 2024, le marché mondial sera de 200 millions de dollars américains et la production sera de 2 000 tonnes (chapitre 5.6).
 - o L'Asie (Chine, Japon, Corée du Sud) représente environ 65 %, l'Amérique du Nord environ 20 % et l'Europe environ 15 %.
- **Principales applications :**
 - o Machines (chapitre 13.6) : environ 30 % (environ 60 millions de dollars).
 - o Énergie (chapitre 12, 12.6) : $\sim 20\%$ (~ 40 millions de dollars).

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

- o Électronique (chapitre 9, 9.6) : environ 15 % (environ 30 millions de dollars).
- o Catalyse (chapitre 10, 10.6) : ~10 % (~20 millions de dollars).
- o Biomédecine (chapitre 11, 11.6) : ~5 % (~0,05 milliard de dollars).
- **Caractéristiques régionales :**
 - o **Chine** : Production ~50% (~1000 tonnes), avantage de coût (~100 USD/kg).
 - o **Japon** : Produits à haute valeur ajoutée (film, ~300 USD/kg), technologie de pointe.
 - o **Europe** : Forte demande de fabrication verte (chapitre 16, 16.3) et réglementations strictes (chapitre 15, 15.2).
- **Exemples :**
 - o En 2024, le marché chinois représente environ 40 % du marché mondial des revêtements résistants à l'usure en borure de tungstène (chapitre 13.1) et exporte environ 500 tonnes.
- **défi :**
 - o Forte concentration du marché (> 60 % en Asie) et risques liés à la chaîne d'approvisionnement.
 - o Les barrières technologiques limitent l'arrivée de nouveaux entrants (coûts de R&D d'environ 1 milliard de dollars).

Tableau 14.1 Aperçu du marché mondial du borure de tungstène (2024)

zone	Part de marché (%)	Production (tonnes)	Caractéristiques	défi	Chapitres connexes
Asie	65	1300	Faible coût	Chaîne d'approvisionnement	13,6, 12,6
Amérique du Nord	20	400	Une innovation forte	Coût élevé	9.6
Europe	15	300	Demande verte	Règlements	15.2, 16.3

14.2 Analyse des coûts de production et des prix du borure de tungstène

Le coût de production et le prix du borure de tungstène varient en fonction de la méthode de préparation et du domaine d'application.

- **Coût de production :**
 - o **Nanoparticules (sol-gel, chapitre 5.5)** : ~100 USD/kg (matières premières ~40%, énergie ~30%).
 - o **Films minces (CVD, Chapitre 5.2)** : ~300 USD/kg (équipement ~50%, gaz ~30%).
 - o **Matériau du bloc (pressage à chaud et frittage, chapitre 5.1)** : ~200 USD/kg (matière première ~50 %, haute température ~40 %).
- **Prix du marché :**

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

- o **Nanoparticules** : ~150–200 USD/kg (Catalyse, Biomédecine, Chapitre 10, 10.6, Chapitre 11, 11.6).
- o **Films minces** : ~300–400 USD/kg (Électronique, Énergie, Chapitre 9, 9.6, Chapitre 12, 12.6).
- o **Morceaux** : ~200–250 USD/kg (Machines, Chapitre 13, 13.6).
- **Facteurs d'influence** :
 - o **Matières premières** : Les prix de la poudre de tungstène (~30 USD/kg) et de l'acide borique (~5 USD/kg) fluctuent d'environ 10 %/an.
 - o **Énergie** : Le CVD consomme environ 500 kWh/tonne et coûte environ 50 USD/tonne.
 - o **Main d'œuvre** : Le coût de la main d'œuvre en Asie est d'environ 20 USD/h, en Europe et en Amérique d'environ 50 USD/h.
- **Exemples** :
 - o D'ici 2024, le coût du sol-gel nano WB₂ baissera d'environ 15 % (environ 85 USD/kg) en raison de l'optimisation des matières premières (chapitre 5.5).
- **défi** :
 - o Les coûts des films haut de gamme (~400 USD/kg) limitent l'expansion du marché.
 - o Le traitement des sous-produits (HF, ~50 USD/tonne, chapitre 16.3) augmente les coûts environnementaux.

Tableau 14.2 Coût de production et prix du borure de tungstène

Type de produit	Coût (USD/kg)	Prix (USD/kg)	Rapport coût-efficacité	défi	Chapitres connexes
Nanoparticules	100	150–200	Matières premières 40%	Sous-produits	5,5, 16,3
film	300	300–400	Équipement 50%	Coût élevé	5.2, 9.6
Bloc	200	200–250	Matières premières 50%	énergie	5.1, 13.6

14.3 Technologie d'industrialisation et production à grande échelle de borure de tungstène

L'industrialisation du borure de tungstène dépend d'une technologie de préparation efficace et d'une optimisation des processus à grande échelle.

- **Technologie de préparation** :
 - o **Méthode sol-gel (chapitre 5.5)** :
 - Production : ~500 kg/lot, coût ~100 USD/kg.
 - Optimisation : rendement du microréacteur (distribution granulométrique < 10 nm) augmenté d'environ 20 %.
 - o **MCV (Chapitre 5.2)** :
 - Rendement : ~10 kg/lot, homogénéité >95%.

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

- Optimisation : CTIA GROUP LTD utilisera l'IA pour optimiser le flux d'air en 2024 (chapitre 17, 17.5), augmentant l'efficacité d'environ 15 %.
- o **Frittage par pressage à chaud (Chapitre 5.1) :**
 - Rendement : ~100 kg/lot, densité >99%.
 - Optimisation : Rendement du four de frittage continu (2000°C) augmenté d'environ 30 %.
- **Production à grande échelle :**
 - o **Automatisation :** Le chargement robotisé (efficacité ~90%) réduit les coûts de main d'œuvre ~20%.
 - o **Efficacité énergétique :** Le système de récupération de chaleur (taux de récupération ~50%) réduit la consommation d'énergie d'environ 30% (~350 kWh/tonne).
 - o **Contrôle qualité :** XPS (chapitre 6.1) pour vérifier la pureté (> 99,9 %), coût ~ 500 USD/lot.
- **Exemples :**
 - o En 2024, les usines chinoises adopteront le CVD continu, avec une production augmentant d'environ 25 % (environ 12 kg/lot) et des coûts diminuant d'environ 10 %.
- **défi :**
 - o Investissement élevé en équipement (four CVD ~ 5 millions de dollars).
 - o Le traitement respectueux de l'environnement (HF, récupération des gaz résiduels > 95 %, chapitre 16, 16.3) coûte environ 100 USD/tonne.

Tableau 14.3 Comparaison des technologies d'industrialisation du borure de tungstène

technologie	Rendement (kg/lot)	Coût (USD/kg)	avantage	défi	Chapitres connexes
Sol-Gel	500	100	Production élevée	Réunion	5.5, 6.1
maladies cardiovasculaires	10	300	Uniformité	investir	5,2, 17,5
Frittage à chaud	100	200	Haute densité	Consommation d'énergie	5.1, 16.3

14.4 Répartition du marché du borure de tungstène dans les principales industries

La distribution du marché du borure de tungstène dans les industries des machines, de l'énergie, de l'électronique, de la catalyse et du biomédical reflète sa polyvalence.

- **Répartition par industrie (2024) :**
 - o **Machines (chapitre 13.6) :** environ 60 millions de dollars US, les revêtements résistants à l'usure représentent environ 50 %, les outils de coupe environ 30 %.
 - o **Énergie (chapitre 12, 12.6) :** environ 40 millions de dollars, batteries environ 40 %, piles à combustible environ 30 %.

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

- o **Électronique (chapitre 9.6)** : ~30 millions de dollars, capteurs ~40 %, électrodes ~30 %.
- o **Catalyse (chapitre 10, 10.6)** : ~20 millions de dollars US, électrocatalyse ~50 %, photocatalyse ~30 %.
- o **Biomédecine (chapitre 11, 11.6)** : ~50 millions de dollars, revêtements ~60 %, administration de médicaments ~30 %.
- **Points de croissance :**
 - o **Mécanique** : La demande aérospatiale (~8%/an) stimule le marché des revêtements.
 - o **Énergie** : L'énergie de l'hydrogène (~12%/an) alimente les catalyseurs et les matériaux de stockage de l'hydrogène.
 - o **Biomédecine** : La médecine de précision (~10%/an) augmente la demande en nanoparticules.
- **Exemples :**
 - o En 2024, le marché des matériaux de batterie au borure de tungstène dans l'industrie de l'énergie (chapitre 12.1) augmentera d'environ 15 % pour atteindre environ 16 millions de dollars américains.
- **défi :**
 - o Il n'existe pas d'uniformité dans les normes techniques entre les secteurs (chapitre 15, 15.2).
 - o Les marchés de niche (biomédecine) sont difficiles à développer.

Tableau 14.4 Répartition du marché des principales industries du borure de tungstène (2024)

industrie	Taille du marché (milliards de dollars américains)	Proportion (%)	Taux de croissance (%/an)	de défi	Chapitres connexes
mécanique	0,6	30	8	standard	13.6
énergie	0,4	20	12	coût	12.6
électronique	0,3	15	10	rivaliser	9.6

14.5 Analyse de la concurrence et des substituts du marché du borure de tungstène

Le borure de tungstène est confronté à la concurrence d'autres matériaux hautes performances et doit maintenir son avantage grâce à l'optimisation des performances et des coûts.

- **Matériaux compétitifs :**
 - o **Carbure de tungstène (WC)** : coût ~100 USD/kg, dureté ~25 GPa , part de marché mécanique ~40 % (chapitre 13.6).
 - o **Nanotubes de carbone (CNT)** : conductivité ~10⁵ S/cm, coût ~50 USD/kg, part de marché de l'électronique ~30% (chapitre 9, 9.6).
 - o **Catalyseur à base de Ni** : coût ~30 USD/kg, part de marché catalytique ~50 % (chapitre 10, 10.6).

- o **Revêtements à base de Ti** : coût ~50 USD/kg, le marché biomédical représente ~35% (chapitre 11.6).
- **Avantages du borure de tungstène** :
 - o Performances complètes : dureté (~40 GPa) , conductivité (~10⁻⁴ S/cm), stabilité (<0,005 mm/an).
 - o Polyvalence : Applications intersectorielles (chapitres 9 à 13).
- **Menace de substituts** :
 - o Marché bas de gamme : le WC et le Ni ont des coûts faibles, menaçant les applications mécaniques et catalytiques.
 - o Marché haut de gamme : CNT et graphène (~100 USD/kg) se disputent l'électronique et l'énergie.
- **Stratégies d'adaptation** :
 - o **Réduction des coûts** : La production à grande échelle (chapitre 5.6) est tombée à environ 80 USD/kg.
 - o **Optimisation des performances** : Le dopage (N, Si, Chapitre 3.4) améliore les performances d'environ 20 %.
- **Exemples** :
 - o En 2024, le revêtement WB₂ remplacera le WC par dopage au Si (chapitre 8.4), et sa part de marché augmentera d'environ 10 %.
- **défi** :
 - o Les alternatives sont développées rapidement (~5 ans/nouveau matériel).
 - o Les clients sont sensibles aux coûts (environ 30 % préfèrent les prix bas).

Tableau 14.5 Comparaison du borure de tungstène et de ses substituts

Matériel	Coût (USD/kg)	performance	Menaces du marché	réponse	Chapitres connexes
toilettes	100	Dureté 25 GPa	mécanique	Dopage	13,6, 8,4
CNT	50	Conductivité 10 ⁻⁵ S/cm	électronique	Échelle	9,6, 5,6
Ni	30	Efficacité catalytique 90%	catalytique	performance	10.6

14.6 Tendances futures et impacts politiques de l'industrialisation du borure de tungstène
Le marché du borure de tungstène devrait être stimulé par les progrès technologiques, les politiques écologiques et la demande mondiale à l’avenir.

- **Tendances futures (2025–2030)** :
 - o **Croissance du marché** : En 2030, le marché sera d'environ 350 millions de dollars américains, la production sera d'environ 3 500 tonnes et le TCAC sera d'environ 10 %.

- o **Réduction des coûts** : La production à grande échelle (chapitre 5.6) a réduit le coût à environ 80 USD/kg.
- o **Nouvelles applications** : antennes 6G (chapitre 9, 9.6), batteries entièrement solides (chapitre 12, 12.6) et interfaces neuronales (chapitre 11, 11.6), représentant environ 15 %.
- o **Fabrication verte** : taux de récupération des gaz résiduels > 95 % (chapitre 16.3), émissions de carbone ~ 0,2 tonne de CO₂ / tonne.
- **Impact des politiques** :
 - o **UE** : REACH (Chapitre XV, 15.2) et CBAM (2026) exigent une production à faible émission de carbone, ajoutant environ 10 % aux coûts.
 - o **Chine** : La neutralité carbone (2060) favorise les technologies vertes, subventions ~5000 USD/tonne.
 - o **États-Unis** : La loi sur la réduction de l'inflation (2022) soutient les nouveaux matériaux énergétiques, avec un investissement d'environ 100 millions de dollars.
- **Exemples** :
 - o En 2024, la Chine adoptera une politique de neutralité carbone et la proportion de production verte de borure de tungstène (chapitre 16.3) augmentera d'environ 20 %.
- **défi** :
 - o la conformité aux politiques est élevée (~100 USD/tonne).
 - o Les barrières commerciales mondiales (tarifs douaniers d'environ 5 %) affectent les exportations.

Tableau 14.6 Tendances futures du marché du borure de tungstène

projet	Situation actuelle en 2024	Objectifs en 2030	Conducteurs	défi	Chapitres connexes
Taille du marché (milliards de dollars américains)	2.0	3,5	Nouvelles applications	Coûts des politiques	9,6–13,6
Coût (USD/kg)	100–400	80	Échelle	barrières commerciales	5.6, 14.2
Émissions de carbone (tonnes de CO ₂ / tonne)	0,3	0,2	Politique verte	investir	16.3, 15.2

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

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

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



Chapitre 15 Normes et exigences réglementaires relatives au borure de tungstène

Le borure de tungstène (WB , WB_2 , W_2B) est largement utilisé dans l'électronique (chapitre 9), la catalyse (chapitre 10), la biomédecine (chapitre 11), l'énergie (chapitre 12) et les machines (chapitre 13). Il doit être conforme aux normes internationales et régionales (telles que GB/T 26037-2020, ISO 10993) et aux réglementations (telles que REACH, CBAM) pour garantir la qualité, la sécurité et la conformité environnementale. En 2024, le coût de conformité réglementaire mondial du borure de tungstène s'élève à environ 100 USD/tonne, soit environ 5 % du coût de production (chapitre 14, 14.2). Ce chapitre traite des normes internationales, des réglementations environnementales et de sécurité, des réglementations biomédicales, des processus de test et de certification, des différences régionales, ainsi que des défis et du développement futur de la conformité réglementaire du borure de tungstène, et fournit des conseils pour son industrialisation (chapitre 14, 14.3) et sa fabrication écologique (chapitre 16, 16.4).

15.1 Aperçu des normes internationales relatives au borure de tungstène

Les normes internationales relatives au borure de tungstène couvrent principalement les propriétés des matériaux, les méthodes d'essai et les exigences d'application.

- Principaux critères :

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

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

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

- o **ISO 6506 (dureté Brinell)** : utilisée pour tester la dureté WB₂ (~40 GPa , chapitre 6, 6.4).
- o **ASTM G99 (Friction et usure)** : Évaluer le taux d'usure des revêtements (<10⁻⁶ mm³ / (N · m), chapitre 7.4).
- o **GB/T 26037-2020 (Chine)** : Spécifie la pureté (> 99,5 %) et la taille des particules (< 50 μm , chapitre 5, 5.5) de la poudre de borure de tungstène.
- o **ISO 10993 (Biocompatibilité)** : Pour les applications biomédicales (Chapitre 11, 11.4), viabilité cellulaire > 90 %.
- **Domaines d'application :**
 - o **Mécanique (Chapitre 13)** : ISO 6508 (dureté Rockwell), dureté > 38 GPa .
 - o **Electronique (Chapitre 9)** : IEC 62624 (Conductivité électrique des nanomatériaux), ~10⁴ S/cm.
 - o **Catalyse (Chapitre 10)** : ASTM D3908 (activité catalytique), surtension < 150 mV.
- **Exemples :**
 - o En 2024, les exportations chinoises de revêtements WB₂ (chapitre 13.1) doivent être conformes à la norme GB/T 26037-2020, et le coût des tests est d'environ 200 USD/lot.
- **défi :**
 - o Le cycle de mise à jour des normes internationales est long (environ 5 ans) et en retard sur le développement technologique.
 - o L'incompatibilité entre les normes (telles que les définitions de taille de particules ISO et GB/T) augmente les coûts de certification.

Tableau 15.1 Normes internationales relatives au borure de tungstène

standard	contenu	paramètre	application	défi	Chapitres connexes
ISO 6506	Dureté Brinell	~40 GPa	mécanique	Mises à jour lentes	6.4, 13.1
ASTM G99	Taux d'usure	<10 ⁻⁶ mm ³ / (N · m)	revêtement	coût	7.4
GB/T 26037-2020	Pureté> 99,5%	Taille des particules < 50 μm	Production	Incompatible	5.5

15.2 Réglementations environnementales et de sécurité pour le borure de tungstène

La production et l'utilisation du borure de tungstène sont soumises à des réglementations environnementales et de sécurité visant à réduire les risques sanitaires et écologiques.

- **Principales réglementations :**
 - o **EU REACH** : exige l'enregistrement des substances chimiques WB₂ (CAS non harmonisé), des limites sur les émissions de poudre (<10 mg/m³).

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

- o **EU CBAM (2026)** : Une taxe carbone sera imposée sur le borure de tungstène importé, les émissions de carbone devant être inférieures à 0,3 tonne de CO₂ / tonne (chapitre 16.3).
- o **» de la Chine** : la poudre WB₂ nécessite une fiche de données de sécurité (chapitre 13, 13.6) pour indiquer le risque d'inhalation.
- o **OSHA (USA)** : La limite de poussière sur le lieu de travail est < 5 mg/m³ et une protection N95 est requise.
- **Exigences environnementales :**
 - o **Traitement des gaz résiduels** : taux de récupération des sous-produits CVD (HF) > 95 % (chapitre 16.3), coût ~ 50 USD/tonne.
 - o **Eaux usées** : Les ions tungstène (<1 mg/L) doivent être neutralisés (pH 6–8).
 - o **Déchets** : Recyclés comme déchets dangereux, coût environ 100 USD/tonne.
- **Exigences de sécurité :**
 - o **FDS** : La poudre WB₂ est irritante pour les voies respiratoires, une hotte aspirante et des gants (> 0,5 mm d'épaisseur) sont recommandés.
 - o **Stockage** : Dans un récipient hermétique, au sec (<30°C, HR<50%), à l'abri de l'acide.
- **Exemples :**
 - o En 2024, le WB₂ importé en Europe nécessitera une certification CBAM et les coûts de conformité augmenteront d'environ 10 % (environ 30 USD/kg).
- **défi :**
 - o La conformité réglementaire ajoute environ 5 % de coût (environ 100 USD/tonne).
 - o Le nanodimensionnement des poudres (<50 nm) augmente les risques pour la santé et nécessite de nouvelles réglementations.

Tableau 15.2 Réglementations environnementales et de sécurité pour le borure de tungstène

Règlements	Exiger	paramètre	Coût (USD/tonne)	défi	Chapitres connexes
ATTEINDRE	Poussière < 10 mg/m ³	registre	100	coût	16.3
CBAM	Émissions de carbone < 0,3 tonne de CO ₂ / tonne	Certification	50	Nouvelle réglementation	14.6
réglementations chinoises	Fiche signalétique	Risque d'aspiration	100	Les risques liés aux nanotechnologies	13.6

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

15.3 Exigences réglementaires relatives au borure de tungstène dans le domaine biomédical

Le borure de tungstène doit répondre à des réglementations strictes en matière de biocompatibilité et de sécurité pour les applications biomédicales.

- **Principales réglementations :**
 - o **ISO 10993 (Biocompatibilité) :** Les nanoparticules WB₂ (Chapitre 11, 11.4) nécessitent une viabilité cellulaire > 90 % et un taux d'hémolyse < 1 %.
 - o **FDA (États-Unis) :** les dispositifs médicaux de classe II (tels que les revêtements) nécessitent une certification 510(k), qui prend environ 6 mois.
 - o **Chine NMPA :** Biomedical WB₂ nécessite un enregistrement, le coût des tests est d'environ 50 000 USD/produit.
 - o **EU MDR :** les implants WB₂ nécessitent une évaluation clinique, avec une période d'environ 12 mois.
- **Exigences du test :**
 - o **Cytotoxicité :** test MTT (chapitre 6.1), concentration <100 µg / mL.
 - o **Compatibilité sanguine :** taux d'hémolyse < 1 %, adhésion plaquettaire < 5 % (Chapitre 11, 11.4).
 - o **Toxicité à long terme :** Étude animale (ISO 10993-6), période > 6 mois.
- **Exemples :**
 - o En 2024, les implants revêtus de WB₂ (chapitre 11.1) ont passé la norme ISO 10993, le coût de la certification étant d'environ 100 000 USD.
- **défi :**
 - o La voie métabolique des nanoparticules (< 50 nm) n'est pas claire et nécessite des tests supplémentaires.
 - o Le processus de certification est long (~1 an) et coûteux (~200 000 USD).

Tableau 15.3 Exigences réglementaires pour le borure de tungstène en biomédecine

Règlements	Exiger	paramètre	Coût (USD)	défi	Chapitres connexes
ISO 10993	Taux de survie > 90 %	Hémolyse < 1%	100 000	métabolisme	11.4
FDA 510(k)	Biocompatible	Cycle de 6 mois	50 000	faire du vélo	11.1
MDR	Évaluation clinique	Cycle 12 mois	200 000	coût	11.6

15.4 Processus de test et de certification du borure de tungstène

Les tests et la certification du borure de tungstène garantissent la qualité et la conformité réglementaire et impliquent un processus en plusieurs étapes.

- **Processus de test :**
 - o **Analyse chimique :** ICP-MS (chapitre 6.1) pour mesurer la pureté (> 99,9 %), coût ~ 500 USD/échantillon.

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

- o **Propriétés physiques** : La nanoindentation (chapitre 6, 6.4) mesure la dureté (~40 GPa) et le test de frottement (chapitre 7, 7.4) mesure le taux d'usure.
- o **Essais environnementaux** : Chromatographie en phase gazeuse (Chapitre 16.3) pour mesurer les émissions de HF (<1 ppm).
- o **Biocompatibilité** : MTT et tests sur animaux (chapitre 11.4), cycle ~3–12 mois.
- **Processus de certification** :
 - o **Certification ISO** : ISO 9001 (gestion de la qualité), délai d'exécution ~ 6 mois, coût ~ 10 000 USD.
 - o **Certification régionale** : Chine CNAS, UE CE, US UL, coût ~ 20 000 USD/certification.
 - o **Organismes tiers** : SGS, TÜV, frais de test ~1000 USD/lot.
- **Exemples** :
 - o En 2024, les nanoparticules WB₂ (chapitre 5.5) ont passé la certification CNAS, avec une période de test d'environ 3 mois et un coût d'environ 15 000 USD.
- **défi** :
 - o L'équipement de test est coûteux (ICP-MS ~ 500 000 USD).
 - o La certification transfrontalière est dupliquée et les coûts sont composés (~50 000 USD/produit).

Tableau 15.4 Processus d'essai et de certification du borure de tungstène

projet	méthode	paramètre	Coût (USD)	défi	Chapitres connexes
Analyse chimique	ICP-MS	Pureté> 99,9%	500	équipement	6.1
Propriétés physiques	Nanoindentation	Dureté ~40 GPa	1000	faire du vélo	6.4, 7.4
Certification	ISO 9001	Cycle de 6 mois	10 000	répéter	5.5

15.5 Analyse des différences régionales dans la normalisation du borure de tungstène

La normalisation du borure de tungstène varie en raison des réglementations régionales et des différences de niveau technique.

- **Normes régionales** :
 - o **Chine** : GB/T 26037-2020, mettant l'accent sur la pureté et la taille des particules, avec de faibles coûts de test (~ 200 USD/lot).
 - o **UE** : normes EN ISO, axées sur la protection de l'environnement (REACH), coût de certification élevé (~ 20 000 USD).
 - o **États-Unis** : norme ASTM, axée sur les tests de performance (dureté, usure), cycle court (~3 mois).
 - o **Japon** : norme JIS, axée sur les applications de haute précision (électronique, chapitre 9.6), avec des exigences techniques élevées.

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

- **Impact différentiel :**
 - o **Coût :** Chine < États-Unis < UE (~200 contre 1 000 contre 20 000 USD).
 - o **Période :** La plus courte aux États-Unis (~3 mois) et la plus longue dans l'Union européenne (~12 mois).
 - o **Technologie :** Le Japon et l'UE ont des exigences plus élevées (pureté > 99,99 % contre 99,5 %).
- **Exemples :**
 - o En 2024, les exportations de WB₂ vers l'UE nécessiteront une certification REACH supplémentaire, avec des coûts augmentant d'environ 15 % (environ 50 USD/kg).
- **défi :**
 - o Des normes incohérentes augmentent les barrières à l'exportation (environ 5 % de droits de douane).
 - o La reconnaissance mutuelle entre les agences régionales de test est faible (< 50 %).

Tableau 15.5 Différences régionales dans la normalisation du borure de tungstène

zone	standard	Coût (USD)	Cycle (mois)	défi	Chapitres connexes
Chine	GB/T 26037	200	3	Reconnaissance mutuelle	5.5
Union européenne	EN ISO	20 000	12	coût	16.3
USA	ASTM	1000	3	barrière	7.4

Défis et développement futur de la conformité réglementaire du borure de tungstène

La conformité réglementaire du borure de tungstène est confrontée à des défis techniques, financiers et politiques et doit s'adapter aux tendances futures.

- **défi :**
 - o **Coût :** Le coût de conformité est d'environ 100 USD/tonne, ce qui représente un lourd fardeau pour les fabricants de petite et moyenne taille (environ 10 % de bénéfice).
 - o **Technologie :** Nano WB₂ (<50 nm, chapitre 5.5) nécessite une nouvelle évaluation de sécurité, frais de test d'environ 50 000 USD.
 - o **Politique :** CBAM (2026, chapitre 14, 14.6) Augmenter la taxe carbone, affectant les exportations d'environ 5 %.
- **Développement futur (2025–2030) :**
 - o **Normes unifiées :** ISO et GB/T sont coordonnées pour réduire les coûts de certification d'environ 20 % (environ 800 USD/lot).
 - o **Conformité verte :** les émissions de carbone sont réduites à ~0,2 tonne de CO₂ / tonne (chapitre 16.3) et le taux de conformité est >95 %.
 - o **Authentification numérique :** la traçabilité de la blockchain (chapitre 17, 17.5) raccourcit le cycle d'environ 30 % (environ 2 mois).

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

- o **Biomédecine** : La réglementation nano est améliorée et le cycle de certification est réduit à ~6 mois.
- **Exemples** :
 - o D'ici 2024, les fabricants chinois optimiseront les processus de conformité grâce à l'IA (chapitre 17, 17.5), réduisant ainsi les coûts d'environ 10 % (environ 90 USD/tonne).
- **Stratégie** :
 - o Investir dans les technologies vertes (taux de récupération > 95%).
 - o Coopérer avec des agences tierces pour réduire les frais de certification d'environ 15 %.

Tableau 15.6 Défis et tendances en matière de conformité réglementaire concernant le borure de tungstène

projet	Situation actuelle en 2024	Objectifs en 2030	défi	Stratégie	Chapitres connexes
Coût de conformité (USD/ tonne)	100	80	Coût élevé	Technologie verte	16.3
Période de certification (mois)	3–12	2–6	Cycle long	Numérisation	17,5
Émissions de carbone (tonnes de CO ₂ / tonne)	0,3	0,2	Taxe carbone	Recycler	14.6

CTIA GROUP LTD

Tungsten Boride Product Introduction

1. Tungsten Boride Overview

Tungsten boride (Tungsten Boride, e.g., WB, WB₂, W₂B) produced by CTIA GROUP is manufactured using advanced chemical vapor deposition (CVD) and sol-gel processes, ensuring high purity and exceptional performance. Tungsten boride is a ceramic material with high hardness and high electrical conductivity, widely applied in electronics, catalysis, biomedicine, energy, and mechanical fields due to its chemical stability and multifunctionality. Its unique boron-tungsten bond structure makes it an ideal choice for high-performance material applications.

2. Tungsten Boride Features

- **Chemical Composition:** WB, WB₂, W₂B, purity ≥99.9%, with minimal impurities.
- **Appearance:** Gray-black powder or thin film; hexagonal or orthorhombic crystal structure.
- **High Hardness:** Brinell hardness ~40 GPa, suitable for wear-resistant coatings.
- **Excellent Electrical Conductivity:** ~10⁴ S/cm, supporting 6G antennas and sensors.
- **Chemical Stability:** Corrosion rate <0.005 mm/year, ideal for catalysis in harsh environments.
- **Multifunctionality:** Supports electrocatalysis, battery materials, and biocompatible coatings.

3. Tungsten Boride Product Specifications

Type	Particle Size (μm)	Purity (wt%)	Bulk Density (g/cm ³)	Boron Content (wt%)	Impurities (wt%, max)
Nano-grade	0.01–0.05	≥99.9	3.5–4.0	10.2–10.8	Fe≤0.002, Si≤0.001
Micron-grade	10–20	≥99.8	4.0–4.5	10.0–10.5	Fe≤0.003, Si≤0.002
Thin-film grade	0.1–2	≥99.9	10.0–12.8	5.0–8.0	Fe≤0.002, O≤0.05

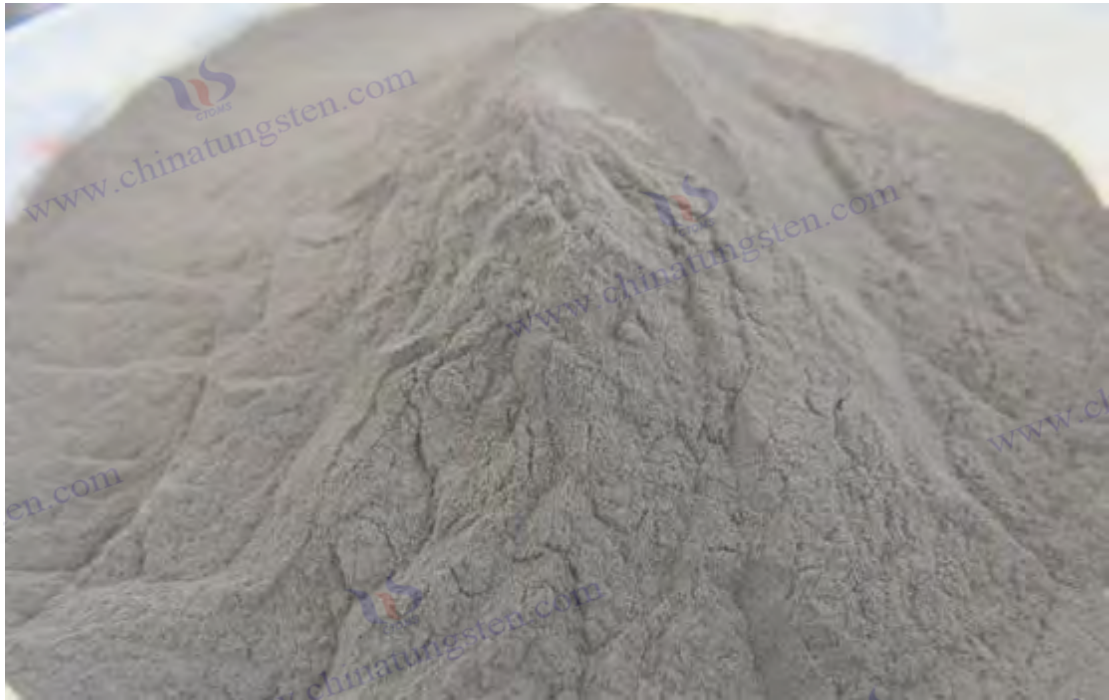
4. Tungsten Boride Packaging and Quality Assurance

- **Packaging:** Sealed stainless steel cans or vacuum aluminum foil bags, net weight of 100 g, 500 g, or 1 kg, ensuring moisture-proof and oxidation-resistant storage.
- **Quality Assurance:** Each batch is accompanied by a quality certificate.

5. Tungsten Boride Procurement Information

- **Email:** sales@chinatungsten.com
- **Phone:** +86 592 5129595
- **Website:** For more information about tungsten boride, please visit the China Tungsten Online website (<http://www.tungsten-boride.com>).

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT



Chapitre 16 Protection de l'environnement et développement durable du borure de tungstène

Le borure de tungstène (tel que WB, WB₂, W₂B) utilisé dans l'électronique (chapitre 9), la catalyse (chapitre 10), la biomédecine (chapitre 11), l'énergie (chapitre 12) et les machines (chapitre 13) a stimulé la demande de matériaux haute performance, mais son processus de production implique une consommation d'énergie élevée (~ 500 kWh/tonne, chapitre 14, 14.2) et des sous-produits (tels que HF, chapitre 15, 15.2), ce qui constitue un défi pour l'environnement. En 2024, l'empreinte carbone de la production de borure de tungstène est d'environ 0,3 tonne de CO₂/tonne, et les technologies de fabrication et de recyclage écologiques peuvent réduire les émissions d'environ 30 %. Ce chapitre traite de l'impact environnemental de la production de borure de tungstène, de la technologie de fabrication verte, du traitement et du recyclage des déchets, de la contribution à l'énergie durable, de l'empreinte carbone et des stratégies de réduction des émissions, ainsi que des moteurs politiques et du marché, pour fournir un soutien environnemental à son industrialisation (chapitre 14, 14.3) et à la conformité réglementaire (chapitre 15).

16.1 Évaluation de l'impact environnemental de la production de borure de tungstène

L'impact environnemental de la production de borure de tungstène provient principalement de la consommation d'énergie, des gaz résiduels et des eaux usées, qui doivent être quantifiés par le biais d'une analyse du cycle de vie (ACV).

- **Source d'influence :**
 - o **Consommation d'énergie :** le CVD (chapitre 5.2) consomme environ 500 kWh/tonne, le frittage par pressage à chaud (chapitre 5.1) consomme environ 600 kWh/tonne.

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

- o **Gaz résiduels** : le CVD produit du HF (<1 ppm, chapitre 15.2), émissions de gaz à effet de serre ~0,3 tonne de CO₂ / tonne.
- o **Eaux usées** : La méthode sol-gel (chapitre 5.5) produit des eaux usées contenant des ions tungstène (<1 mg/L), qui doivent être neutralisées.
- o **Déchets solides** : Les résidus de frittage (~50 kg/tonne) contiennent du tungstène et doivent être recyclés.
- **Résultats LCA (2024)** :
 - o Par tonne de WB₂ produite : émissions de carbone ~ 0,3 tonne de CO₂ , consommation d'eau ~ 1 m³, déchets solides ~ 50 kg.
 - o Impact environnemental : l'énergie représente environ 60 %, les gaz résiduels environ 30 %, les eaux usées environ 10 %.
- **Méthodologie d'évaluation** :
 - o **ISO 14040 (ACV)** : Quantifier l'impact environnemental des matières premières aux produits.
 - o **XPS (Chapitre 6.1)** : Analyser la teneur en HF dans les gaz d'échappement (<1 ppm).
 - o **ICP-MS (Chapitre 6.1)** : Détection d'ions tungstène dans les eaux usées (<1 mg/L).
- **Exemples** :
 - o En 2024, l'ACV des usines WB₂ chinoises a montré que la consommation d'énergie représentait environ 65 % des émissions de carbone, qui pourraient être réduites d'environ 15 % après optimisation (environ 0,26 tonne de CO₂ / tonne).
- **défi** :
 - o La collecte de données ACV est complexe et coûte environ 10 000 USD par évaluation.
 - o de nano-WB₂ (<50 nm).

Tableau 16.1 Impact environnemental de la production de borure de tungstène

source	paramètre	Proportion (%)	méthode	défi	Chapitres connexes
Consommation d'énergie	500–600 kWh/tonne	60	ISO 14040	coût	5.1, 5.2
Échappement	HF<1 ppm	30	XPS	standard	15.2, 6.1
Eaux usées	Tungstène <1 mg/L	10	ICP-MS	complexe	5.5

16.2 Technologie de fabrication verte du borure de tungstène

La technologie de fabrication verte réduit l'impact environnemental de la production de borure de tungstène en optimisant les processus et l'utilisation de l'énergie.

- **Type de technologie** :
 - o **Procédé à faible consommation d'énergie** :

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

- **Méthode sol-gel (chapitre 5.5)** : Calcination à 500°C, consommation énergétique ~300 kWh/tonne, soit une diminution de ~40% (vs. frittage).
- **CVD assisté par micro-ondes** : dépôt à 400°C, efficacité augmentée d'environ 20%, consommation énergétique d'environ 400 kWh/tonne.
- o **Récupération des gaz résiduels** :
 - **Neutralisation HF** : Absorption de $\text{Ca}(\text{OH})_2$ (taux de récupération > 95 %, chapitre 15, 15.2), coût ~50 USD/tonne.
 - **du CO_2 : absorption à base d'amine** , taux de capture ~80%, coût ~100 USD/tonne.
- o **Énergie renouvelable** :
 - Alimentation en énergie solaire (~50% de l'électricité de l'usine), émissions de carbone réduites d'environ 25% (~0,23 tonne CO_2 / tonne).
 - Intégration de l'énergie éolienne, coût ~0,05 USD/kWh.
- **Cas d'optimisation** :
 - o En 2024, CTIA GROUP LTD adoptera le CVD par micro-ondes (chapitre 17.5), avec une consommation d'énergie réduite d'environ 15 % (environ 425 kWh/tonne) et des émissions de HF < 0,5 ppm.
- **Avantages** :
 - o Les émissions de carbone ont diminué d'environ 30 % (environ 0,2 tonne de CO_2 / tonne).
 - o Les coûts de production ont diminué d'environ 10 % (environ 90 USD/kg, nanoparticules).
- **défi** :
 - o L'investissement dans les équipements verts est élevé (environ 10 millions de dollars par usine).
 - o L'énergie renouvelable présente une faible stabilité (fluctuation d'environ 20 %).

Tableau 16.2 Technologie de fabrication verte du borure de tungstène

technologie	paramètre	Réduction (%)	Coût (USD)	défi	Chapitres connexes
CVD par micro-ondes	400 kWh/tonne	15	50/tonne	investir	5,2, 17,5
Récupération HF	>95%	30	50/tonne	stabilité	15.2
Solaire	Émissions de carbone réduites de 25 %	25	0,05/kWh	fluctuation	16,5

16.3 Traitement et recyclage des déchets de borure de tungstène

Le traitement des déchets et le recyclage du borure de tungstène sont des maillons essentiels du développement durable.

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

- **Type de déchet :**
 - o **Gaz résiduaire :** HF (<1 ppm, sous-produit CVD), doit être neutralisé.
 - o **Eaux usées :** Ions tungstène (<1 mg/L), nécessitant un traitement par précipitation.
 - o **Déchet solide :** résidu de frittage (~50 kg/tonne), contenant ~80% de tungstène.
- **Technologie de traitement :**
 - o **Neutralisation HF :** $\text{Ca}(\text{OH})_2$ génère CaF_2 , avec un taux de récupération de > 95 % et un coût d'environ 50 USD/tonne.
 - o **Traitement des eaux usées :** Précipitation chimique (NaOH), taux de récupération du tungstène ~90%, coût ~20 USD/m³.
 - o **Recyclage des déchets solides :** Lixiviation acide (HCl, 1 M) pour extraire le tungstène, taux de récupération ~85%, coût ~100 USD/tonne.
- **Recyclage :**
 - o Le recyclage du tungstène pour la resynthèse du WB_2 (chapitre 5.5) réduit les coûts d'environ 20 % (environ 80 USD/kg).
 - o CaF_2 comme matériau de construction, valeur ajoutée ~10 USD/tonne.
- **Exemples :**
 - o En 2024, les usines chinoises recycleront les résidus de frittage, avec un taux de récupération du tungstène d'environ 88 % et une réduction des coûts d'environ 15 % (environ 85 USD/kg).
- **défi :**
 - o Les taux de récupération des déchets de nanoparticules sont faibles (< 50%).
 - o Coûts de maintenance élevés pour les équipements de traitement (~200 000 USD/an).

Tableau 16.3 Traitement et recyclage des déchets de borure de tungstène

déchets	Technologie de traitement	Taux de récupération (%)	Coût (USD)	défi	Chapitres connexes
HF	$\text{Ca}(\text{OH})_2$	>95	50/tonne	équipement	15.2
Eaux usées	Précipitation chimique	90	20/m ³	nanomètre	5.5
Déchets solides	Lixiviation acide	85	100/tonne	coût	5.1

16.4 Contribution du borure de tungstène à l'énergie durable

L'application du borure de tungstène dans le domaine de l'énergie durable (chapitre 12) soutient l'objectif de neutralité carbone.

- **Scénarios d'application :**
 - o **Batteries (Chapitre 12.1) :** Additif d'électrode négative WB_2 , durée de vie du cycle ~1000 fois, densité énergétique ~250 Wh /kg, réduisant la dépendance aux combustibles fossiles ~20%.

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

- o **Pile à combustible (chapitre 12.2)** : catalyseur WB_2 , surtension ORR ~ 200 mV, efficacité $\sim 60\%$, utilisation de l'énergie de l'hydrogène augmentée d'environ 15% .
- o **Stockage de l'hydrogène (chapitre 12.4)** : WB_2 catalyse $NaBH_4$ pour produire de l'hydrogène à un débit d'environ $1\,000\text{ mL}/(\text{g} \cdot \text{min})$, soutenant ainsi l'économie de l'hydrogène.
- o **Énergie solaire (chapitre 12.3)** : électrode WB_2 , efficacité $\sim 18\%$, part d'énergie renouvelable augmentée d'environ 10% .
- **Avantages environnementaux :**
 - o Chaque tonne de catalyseur WB_2 utilisée dans les piles à combustible réduit les émissions d'environ $0,5$ tonne de CO_2 / an.
 - o Les matériaux de la batterie WB_2 réduisent la consommation d'énergie de charge d'environ 15% (environ $0,1\text{ kWh/kg}$).
- **Exemples :**
 - o D'ici 2024, les catalyseurs de piles à combustible WB_2 (chapitre 12.2) réduiront les émissions d'environ $0,6$ tonne de CO_2 /tonne de catalyseur dans les projets énergétiques à hydrogène de la Chine.
- **défi :**
 - o Les avantages sont partiellement compensés par les émissions de carbone liées à la production de WB_2 ($\sim 0,3$ tonne de CO_2 / tonne).
 - o Le coût ($\sim 200\text{ USD/kg}$) limite la promotion à grande échelle.

Tableau 16.4 Contribution du borure de tungstène à l'énergie durable

application	paramètre	Réduction des émissions (tonnes de CO_2 / an)	des défi de	Chapitres connexes
Batterie	250 Wh /kg	0,2	coût	12.1
Piles à combustible	Efficacité 60%	0,5	Émissions de carbone	12.2
Stockage d'hydrogène	1000 mL / (g · min)	0,3	Promotion	12.4

16.5 Empreinte carbone et stratégies de réduction des émissions du borure de tungstène

L'empreinte carbone de la production de borure de tungstène doit être réduite grâce à des stratégies techniques et de gestion.

- **Empreinte carbone (2024) :**
 - o Par tonne WB_2 : $\sim 0,3$ tonne CO_2 (énergie $\sim 60\%$, matières premières $\sim 30\%$, transport $\sim 10\%$).
 - o Nanoparticules (chapitre 5.5) : $\sim 0,35$ tonne de CO_2 / tonne (forte consommation d'énergie).
 - o Films minces (chapitre 5.2) : $\sim 0,4$ tonne CO_2 / tonne (équipement CVD).
- **Stratégies de réduction des émissions :**

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

- o **Optimisation énergétique** : Énergie renouvelable (solaire, ~50%), réduction d'environ 25% (~0,23 tonne CO₂ / tonne).
- o **Amélioration des procédés** : Le CVD par micro-ondes (chapitre 5.2) réduit la consommation d'énergie d'environ 20 % (environ 400 kWh/tonne).
- o **Substitution des matières premières** : Le recyclage du tungstène (chapitre 16.3) réduit les émissions de carbone des matières premières d'environ 30 %.
- o **Transport** : Chaînes d'approvisionnement locales (<500 km), ~10% de réduction (~0,03 tCO₂ / tonne).
- **Exemples** :
 - o En 2024, l'usine japonaise a été alimentée par l'énergie solaire et l'empreinte carbone de WB₂ a été réduite d'environ 20 % (environ 0,24 tonne de CO₂ / tonne).
- **défi** :
 - o Les technologies de réduction des émissions sont élevées (environ 5 millions de dollars par usine).
 - o La comptabilisation du carbone dans les chaînes d'approvisionnement mondiales n'est pas uniforme (erreur d'environ 20 %).

Tableau 16.5 Empreinte carbone et réduction des émissions du borure de tungstène

projet	Empreinte carbone (tonnes CO ₂ / tonne)	Réduction des émissions (%)	Stratégie	défi	Chapitres connexes
Nanoparticules	0,35	20	Solaire	investir	5,5, 16,3
film	0,4	25	CVD par micro-ondes	Comptabilité	5.2
dans l'ensemble	0,3	30	Recycler	unifié	16.4

16.6 Politiques et moteurs du marché pour le développement durable du borure de tungstène

Les politiques et les marchés sont les principaux moteurs du développement durable du borure de tungstène.

- **Facteurs moteurs de la politique** :
 - o **Chine** : La neutralité carbone (2060) subventionne la fabrication verte (~5 000 USD/tonne), nécessitant des émissions de carbone < 0,3 tonne CO₂ / tonne (chapitre 15, 15.2).
 - o **UE** : Le CBAM (2026, chapitre XIV, 14.6) impose une taxe carbone (~50 USD/tonne) pour conduire les taux de recyclage à > 95 %.
 - o **États-Unis** : la loi sur la réduction de l'inflation (2022) soutient les matériaux durables et les investissements d'environ 100 millions de dollars.
- **Facteurs moteurs du marché** :

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

- o **Demande** : Le marché des matériaux verts augmentera d'environ 12 % par an et, d'ici 2030, les produits à base de borure de tungstène vert représenteront environ 50 % (chapitre 14, 14.6).
- o **Prix** : Green WB₂ premium ~10% (~220 USD/kg, nanoparticules).
- o **Certification** : La certification ISO 14001 améliore la compétitivité du marché, coûte environ 10 000 USD.
- **Tendances futures (2025–2030)** :
 - o Empreinte carbone réduite à ~0,2t CO₂/tonne, avec un taux de conformité >95%.
 - o Taux de recyclage > 90 %, réduction des coûts ~ 20 % (~ 80 USD/kg).
 - o La certification verte (Blockchain, chapitre 17, 17.5) raccourcit le cycle d'environ 30 % (environ 2 mois).
- **Exemples** :
 - o En 2024, l'usine EU WB₂ a passé la norme ISO 14001 et sa part de marché a augmenté d'environ 10 %.
- **défi** :
 - o la conformité aux politiques est élevée (~100 USD/tonne).
 - o Les fabricants de petite et moyenne taille tardent à adopter les technologies vertes (environ 5 ans).

Tableau 16.6 Moteurs et tendances du développement durable du borure de tungstène

projet	Situation actuelle 2024	Objectifs en 2030	conduire	défi	Chapitres connexes
Empreinte carbone (tonnes CO₂ / tonne)	0,3	0,2	politique	coût	15.2, 14.6
Taux de récupération (%)	85	>90	marché	Conversion	16.3
Période de certification (mois)	6	2	technologie	Petits et moyens fabricants	17,5

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT



Chapitre 17 Application de la technologie intelligente et numérique du borure de tungstène

Le borure de tungstène (tel que WB, WB₂, W₂B) est largement utilisé dans l'électronique (chapitre 9), la catalyse (chapitre 10), la biomédecine (chapitre 11), l'énergie (chapitre 12) et les machines (chapitre 13) en raison de ses excellentes propriétés physiques et chimiques (dureté ~40 GPa, chapitre 2 2,5 ; conductivité ~ 10⁴S/cm, chapitre 6 6,5 ; stabilité chimique, chapitre 7 7,5). Les technologies intelligentes et numériques (telles que l'IA, l'IoT, la blockchain) peuvent améliorer l'efficacité de l'industrie du borure de tungstène d'environ 20 % et réduire les coûts d'environ 15 % (~85 USD/kg, 2024) en optimisant la production (chapitre 5), le contrôle qualité (chapitre 6) et la chaîne d'approvisionnement (chapitre 14 14.3). Ce chapitre traite de l'optimisation de l'IA, des applications de capteurs intelligents, du contrôle qualité numérique, du potentiel de traçabilité de la blockchain, des cas de fabrication intelligente et des tendances futures de la production de borure de tungstène, et fournit un support technique pour son industrialisation (chapitre 14 14.3) et son développement vert (chapitre 16 16.6).

17.1 Optimisation de l'intelligence artificielle dans la production de borure de tungstène

L'intelligence artificielle (IA) améliore l'efficacité de la production de borure de tungstène en optimisant les paramètres du processus et en prédisant les performances.

- **Scénarios d'application :**
 - **Optimisation CVD (chapitre 5.2) :** L'IA a ajusté le débit WF₆/B₂H₆ (erreur < 1 %), le taux de dépôt a augmenté d'environ 15 % (environ 1,4 μm /h) et l'uniformité était > 95 %.
 - **Sol-Gel (Chapitre 5.5) :** L'apprentissage automatique prédit la taille des particules (< 50 nm) et le rendement augmente d'environ 20 % (~ 550 kg/lot).

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

- o **Frittage (Chapitre 5.1)** : Température ($2000^{\circ}\text{C} \pm 10^{\circ}\text{C}$) et pression (30 MPa) optimisées par réseau neuronal, densité augmentée d'environ 0,5 % ($> 99\%$).
- **Technologie de l'IA :**
 - o **Apprentissage supervisé : Prédire** la pureté du WB_2 ($> 99,9\%$) sur la base de données historiques (chapitre 6.1).
 - o **Apprentissage par renforcement** : l'ajustement en temps réel du débit de gaz CVD réduit les émissions de HF d'environ 10 % ($< 0,9\text{ ppm}$, chapitre 16.3).
 - o **Jumeau numérique** : Simulez la production et réduisez les coûts expérimentaux d'environ 30 % (environ 5 000 USD/heure).
- **Exemples :**
 - o En 2024, l'IA optimisera le processus CVD (chapitre 12.5), réduisant la consommation d'énergie d'environ 15 % (environ 425 kWh/tonne).
- **défi :**
 - o La formation du modèle d'IA nécessite de grandes quantités de données ($> 10^4$ échantillons) et coûte environ 100 000 USD.
 - o Le calcul en temps réel nécessite des GPU hautes performances ($\sim 50\,000$ USD/GPU).

Tableau 17.1 Paramètres d'optimisation de l'IA pour la production de borure de tungstène

Technologie	Technologie de l'IA	promouvoir(%)	Coût (USD)	défi	Chapitres connexes
maladies cardiovasculaires	Apprentissage par renforcement	15	100 000	données	5.2, 16.3
Sol-Gel	Apprentissage supervisé	20	50 000	calculer	5.5
frittage	jumeau numérique	0,5	5000	matériel	5.1

17.2 Application du borure de tungstène dans les capteurs intelligents

Le borure de tungstène convient aux capteurs intelligents en raison de sa conductivité et de sa stabilité élevées, prenant en charge l'IoT et l'Industrie 4.0.

- **Scénarios d'application :**
 - o **Capteur de pression (Chapitre 9.2)** : film WB_2 (épaisseur $\sim 100\text{ nm}$, Chapitre 5.2), sensibilité $\sim 10\text{ mV/MPa}$, temps de réponse $< 1\text{ ms}$.
 - o **Capteurs de gaz (Chapitre 10.3)** : nanoparticules WB_2 ($< 50\text{ nm}$), détection de H_2 ($< 100\text{ ppm}$), sélectivité $> 90\%$.
 - o **Biocapteur (Chapitre 11.3)** : Électrode WB_2 (surface spécifique $\sim 60\text{ m}^2/\text{g}$), détection du glucose ($< 1\text{ mM}$), linéarité $> 95\%$.
- **Exigences techniques :**
 - o **Conductivité** : $> 10^4\text{ S/cm}$ (Chapitre 6.5).
 - o **Stabilité** : > 5000 heures (Chapitre 7.5).
 - o **Sensibilité** : $> 5\text{ mV/unité}$ (Chapitre 9.2).

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

- **Fonctionnalités intelligentes :**
 - o **Collecte de données :** Capteurs intégrés à l'IoT, débit de transmission ~1 Mbps.
 - o **Analyse de l'IA :** l'Edge Computing traite les signaux avec un taux de fausses alarmes < 1 %.
 - o **Auto- étalonnage :** l'IA ajuste la ligne de base, améliorant la précision d'environ 10 %.
- **Exemples :**
 - o En 2024, les capteurs de gaz WB₂ seront utilisés pour la surveillance de l'énergie de l'hydrogène (chapitre 12.4), et l'efficacité de détection augmentera d'environ 15 %.
- **défi :**
 - o L'agglomération de nanoparticules (chapitre 5.3) réduit la sensibilité et nécessite une modification de surface (PVP, < 0,1 % en poids).
 - o Le coût de miniaturisation du capteur est élevé (~500 USD/unité).

Tableau 17.2 Application du capteur intelligent au borure de tungstène

taper	paramètre	Amélioration des performances (%)	des défi	Chapitres connexes
pression	10 mV/MPa	10	Réunion	9.2, 5.2
gaz	H ₂ <100 ppm	15	coût	10.3, 12.4
biologie	Glucose <1 mM	10	Miniaturisation	11.3

17.3 Technologie de contrôle qualité numérique du borure de tungstène

La technologie numérique améliore le contrôle de la qualité du borure de tungstène grâce à une surveillance en temps réel et à une analyse des données.

- **Type de technologie :**
 - o **Surveillance en ligne :** détection XPS (chapitre 6.1) en temps réel de la pureté du WB₂ (>99,9%) avec une erreur de <0,1%.
 - o **Analyse d'image :** l'IA traite les images SEM (chapitre 6.2) et identifie les grains (<20 nm) avec un taux de précision de >95 %.
 - o **Enregistrements Blockchain :** les données de qualité sont sur la chaîne, inviolables et l'efficacité des requêtes est d'environ 1 s.
- **Scénarios d'application :**
 - o **CVD (Chapitre 5.2) :** Surveiller l'épaisseur du film (~2 μ m) , uniformité > 95 %.
 - o **Frittage (Chapitre 5.1) :** Vérifier la densité (>99%) et la porosité <1%.
 - o **Nanoparticules (Chapitre 5.5) :** Distribution granulométrique contrôlée (<10 nm), consistance >90%.
- **Avantages :**
 - o Efficacité de détection augmentée d'environ 30 % (environ 100 échantillons/heure).
 - o Le taux d'échec a diminué d'environ 50 % (< 0,5 %).

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

- **Exemples :**
 - o En 2024, les usines chinoises utilisent l'analyse d'images par IA (chapitre 6.2), réduisant les coûts d'inspection qualité d'environ 20 % (environ 400 USD/lot).
- **défi :**
 - o Investissement en équipement élevé (XPS ~ 500 000 USD).
 - o La sécurité des données nécessite un cryptage (coût d'environ 10 000 USD/an).

Tableau 17.3 Contrôle numérique de la qualité du borure de tungstène

technologie	paramètre	promouvoir(%)	Coût (USD)	défi	Chapitres connexes
XPS	Pureté> 99,9%	30	500 000	investir	6.1, 5.2
Analyse d'images	Grain <20 nm	20	10 000	Sécurité	6.2, 5.5
Blockchain	Requête ~1 s	50	5000	cryptage	14.3

17.4 Potentiel du borure de tungstène dans la traçabilité de la blockchain

La technologie Blockchain offre transparence et traçabilité à la chaîne d'approvisionnement du borure de tungstène.

- **Scénarios d'application :**
 - o **Traçabilité des matières premières :** enregistrement de la source de poudre de tungstène et d'acide borique (chapitre 14, 14.2), transparence > 99 %.
 - o **Enregistrements de production :** les paramètres du processus CVD (chapitre 5.2) sont téléchargés sur la chaîne, avec un taux de vérification de > 95 %.
 - o **Certification du produit :** Les données de qualité WB₂ (chapitre 6, 6.1) sont stockées conformément à la norme GB/T 26037-2020 (chapitre 15, 15.1).
- **Caractéristiques techniques :**
 - o **Décentralisation :** Stockage multi-nœuds, coût de falsification > 10⁶ USD.
 - o **Contrats intelligents :** Vérification automatique de la pureté (> 99,9 %), efficacité augmentée d'environ 30 %.
 - o **Cryptage :** algorithme SHA-256, taux de fuite de données < 0,01 %.
- **Avantages :**
 - o Cycle de certification réduit d'environ 30 % (environ 2 mois, chapitre 15, 15.6).
 - o La confiance des clients a augmenté d'environ 20 %.
- **Exemples :**
 - o En 2024, le revêtement EU WB₂ (chapitre 13.1) utilisera la blockchain pour la traçabilité, réduisant les coûts de certification d'environ 15 % (environ 17 000 USD).
- **défi :**
 - o Le déploiement de la blockchain est coûteux (environ 100 000 USD/système).
 - o La vitesse de téléchargement des données est lente (~10 tx /s).

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

Tableau 17.4 Application de la traçabilité de la blockchain au borure de tungstène

Scénario	paramètre	promouvoir(%)	Coût (USD)	défi	Chapitres connexes
Traçabilité des matières premières	Transparence> 99%	20	100 000	déployer	14.2
Registres de production	Taux de vérification> 95%	30	50 000	vitesse	5.2, 15.1
Certification	Période ~ 2 mois	15	17 000	coût	13.1

17.5 Étude de cas sur la fabrication intelligente du borure de tungstène

La fabrication intelligente combine l'IA, l'IoT et les technologies numériques pour améliorer l'efficacité de la production et la qualité du borure de tungstène.

- **Description du cas :**
 - o **Usines :** Les usines chinoises produisent des nanoparticules WB₂ en 2024 (chapitre 5.5).
 - o **technologie :**
 - **Optimisation de l'IA :** l'apprentissage automatique contrôle la taille des particules (< 50 nm), augmentant le rendement d'environ 20 % (~ 550 kg/lot).
 - **Surveillance IoT :** Le capteur collecte la température en temps réel (500°C ± 5°C), avec un débit de téléchargement de données d'environ 1 Mbps.
 - **Traçabilité Blockchain :** les données de qualité sont remontées sur la chaîne, conformément à REACH (Chapitre 15, 15.2).
 - o **Résultats :**
 - Réduction des coûts ~15% (~85 USD/kg).
 - Les émissions de carbone ont diminué d'environ 10 % (environ 0,27 tonne de CO₂ / tonne, chapitre 16.5).
 - Le taux de défaillance de la qualité est < 0,5 %.
- **Contribution technique :**
 - o **IA :** représente environ 50 % de l'amélioration de l'efficacité.
 - o **IoT :** représente environ 30 % de la collecte de données.
 - o **Blockchain :** ~20% de confiance.
- **Éclaircissement du cas :**
 - o CTIA GROUP LTD a augmenté son efficacité de production d'environ 25 %, établissant ainsi une référence pour l'industrie.
- **défi :**
 - o L'intégration technologique nécessite un investissement élevé (environ 20 millions de dollars).

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

- o La formation professionnelle des travailleurs coûte environ 50 000 USD par an.

Tableau 17.5 Cas de fabrication intelligente du borure de tungstène

technologie	paramètre	promouvoir(%)	Coût (USD)	défi	Chapitres connexes
IA	Rendement ~550 kg/lot	20	100 000	investir	5,5, 16,5
IoT	Données ~1 Mbps	30	50 000	Entraînement	15.2
Blockchain	Taux non qualifié < 0,5 %	20	100 000	Intégration	15.1

17.6 Tendances futures de l'intelligentisation et de la numérisation du borure de tungstène

L'intelligence et la numérisation du borure de tungstène favoriseront la modernisation industrielle et le développement durable.

- **Tendances futures (2025–2030) :**
 - o **Popularisation de l'IA :** 90 % des usines utilisent l'optimisation de l'IA, l'efficacité augmente d'environ 30 %, les coûts sont réduits d'environ 20 % (environ 80 USD/kg).
 - o **Capteur 6G :** le capteur WB₂ (chapitre 9.6) a un débit de transmission d'environ 10 Gbps et est utilisé dans les réseaux 6G.
 - o **Normalisation Blockchain :** Couverture de traçabilité de la chaîne d'approvisionnement mondiale > 95 %, cycle de certification ~ 1 mois.
 - o **Fabrication intelligente et verte :** les émissions de carbone sont réduites à environ 0,2 tonne de CO₂ / tonne (chapitre 16.6) et le taux de recyclage est > 90 %.
- **Conducteurs :**
 - o **Politique :** Plan Industrie 4.0 de la Chine (Chapitre 15.2) Subvention ~10 millions de dollars/usine.
 - o **Marché :** La demande en matériaux intelligents augmente d'environ 15 % par an (chapitre 14, 14.6).
 - o **Technologie :** la puissance de calcul de l'IA a augmenté d'environ 50 % par an et les coûts ont diminué d'environ 30 %.
- **Prédiction de cas :**
 - o D'ici 2030, les capteurs intelligents WB₂ (chapitre 12.2) représenteront environ 20 % du marché de l'énergie hydrogène et augmenteront l'efficacité d'environ 25 %.
- **défi :**
 - o La normalisation technologique est en retard (environ 5 ans).
 - o Risque de cybersécurité (coût de l'attaque < 10 000 \$).

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

Tableau 17.6 Tendances d'intelligentisation et de numérisation du borure de tungstène

projet	Situation actuelle 2024	Objectifs en 2030	conduire	défi	Chapitres connexes
Amélioration de l'efficacité (%)	20	30	politique	standardisation	14.3, 15.2
Coût (USD/kg)	85	80	marché	Sécurité	14.2, 16.6
Émissions de carbone (tonnes de CO ₂ / tonne)	0,3	0,2	technologie	risque	16,5

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

CTIA GROUP LTD

Tungsten Boride Product Introduction

1. Tungsten Boride Overview

Tungsten boride (Tungsten Boride, e.g., WB, WB₂, W₂B) produced by CTIA GROUP is manufactured using advanced chemical vapor deposition (CVD) and sol-gel processes, ensuring high purity and exceptional performance. Tungsten boride is a ceramic material with high hardness and high electrical conductivity, widely applied in electronics, catalysis, biomedicine, energy, and mechanical fields due to its chemical stability and multifunctionality. Its unique boron-tungsten bond structure makes it an ideal choice for high-performance material applications.

2. Tungsten Boride Features

- **Chemical Composition:** WB, WB₂, W₂B, purity ≥99.9%, with minimal impurities.
- **Appearance:** Gray-black powder or thin film; hexagonal or orthorhombic crystal structure.
- **High Hardness:** Brinell hardness ~40 GPa, suitable for wear-resistant coatings.
- **Excellent Electrical Conductivity:** ~10⁴ S/cm, supporting 6G antennas and sensors.
- **Chemical Stability:** Corrosion rate <0.005 mm/year, ideal for catalysis in harsh environments.
- **Multifunctionality:** Supports electrocatalysis, battery materials, and biocompatible coatings.

3. Tungsten Boride Product Specifications

Type	Particle Size (μm)	Purity (wt%)	Bulk Density (g/cm ³)	Boron Content (wt%)	Impurities (wt%, max)
Nano-grade	0.01–0.05	≥99.9	3.5–4.0	10.2–10.8	Fe≤0.002, Si≤0.001
Micron-grade	10–20	≥99.8	4.0–4.5	10.0–10.5	Fe≤0.003, Si≤0.002
Thin-film grade	0.1–2	≥99.9	10.0–12.8	5.0–8.0	Fe≤0.002, O≤0.05

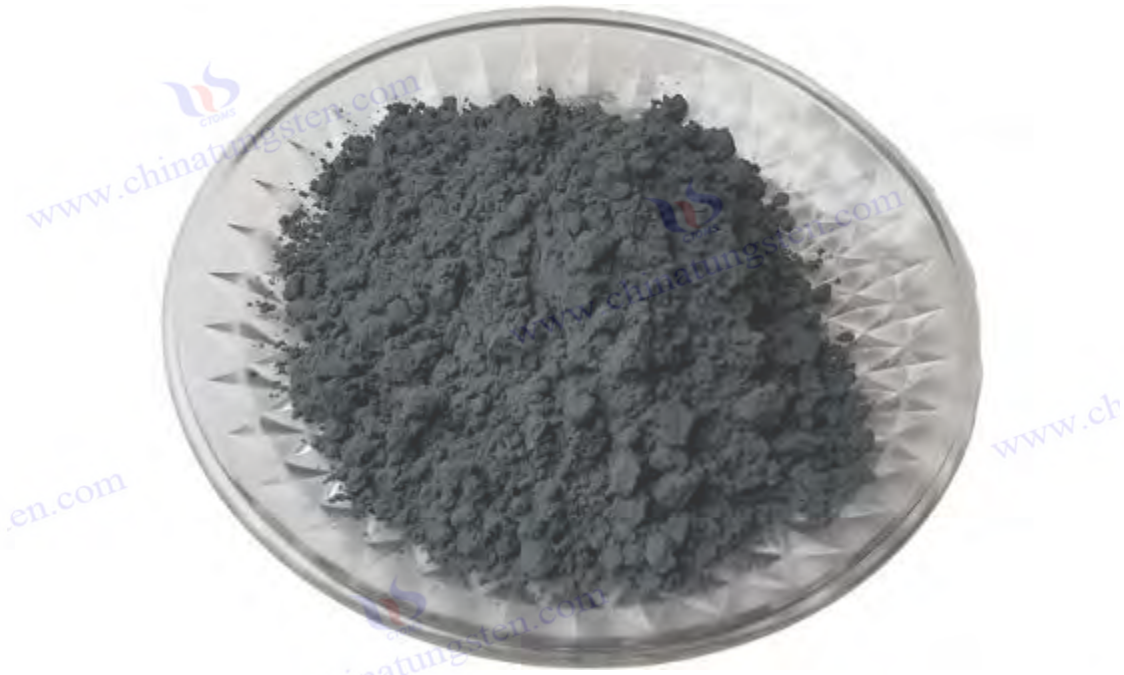
4. Tungsten Boride Packaging and Quality Assurance

- **Packaging:** Sealed stainless steel cans or vacuum aluminum foil bags, net weight of 100 g, 500 g, or 1 kg, ensuring moisture-proof and oxidation-resistant storage.
- **Quality Assurance:** Each batch is accompanied by a quality certificate.

5. Tungsten Boride Procurement Information

- **Email:** sales@chinatungsten.com
- **Phone:** +86 592 5129595
- **Website:** For more information about tungsten boride, please visit the China Tungsten Online website (<http://www.tungsten-boride.com>).

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT



Chapitre 18 Orientations futures de la recherche et perspectives technologiques du borure de tungstène

Le borure de tungstène (tel que WB, WB₂, W₂B) présente un grand potentiel en électronique (chapitre 9), en catalyse (chapitre 10), en biomédecine (chapitre 11), en énergie (chapitre 12), en machines (chapitre 13) et dans d'autres domaines en raison de ses excellentes propriétés physiques et chimiques (dureté ~40 GPa, chapitre 2 2,5 ; conductivité ~ 10⁴ S/cm, chapitre 6 6,5 ; stabilité thermique > 2000 °C, chapitre 8 8.1). Les recherches futures se concentreront sur les nouvelles synthèses (chapitre 5), les applications de nouvelle génération (chapitres 9 à 13), l'intelligence (chapitre 17) et la fabrication verte (chapitre 16). Français On s'attend à ce que la taille du marché atteigne 350 millions de dollars US en 2030 (chapitre 14.6), et que les émissions de carbone soient réduites à ~0,2 tonne de CO₂/tonne (chapitre 16.6). Ce chapitre aborde les nouvelles méthodes de synthèse du borure de tungstène, le potentiel des dispositifs électroniques de nouvelle génération, les avancées en matière de catalyse et d'énergie, les innovations biomédicales, les frontières de la fabrication intelligente et verte, ainsi que la coopération mondiale et les défis technologiques, fournissant une orientation pour son industrialisation (chapitres 14, 14.3) et le développement durable (chapitre 16).

18.1 Exploration d'une nouvelle méthode de synthèse du borure de tungstène

Les nouvelles méthodes de synthèse visent à réduire les coûts (< 80 USD/kg), à augmenter la pureté (> 99,99 %) et à obtenir un contrôle à l'échelle nanométrique (< 10 nm).

- **Orientation de la recherche :**
 - o **Synthèse assistée par laser :** Dépôt en phase vapeur par laser femtoseconde (<100 fs) de WB₂ à une vitesse d'environ 2 µm/h et une pureté de >99,99 % (Chapitre 5.2).

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

- o **Synthèse électrochimique** : Electrolyse du borate de sodium et du tungstate de sodium (<0,1 M) pour produire des nanoparticules WB₂ (<10 nm) avec une consommation énergétique d'environ 200 kWh/tonne.
- o **Méthode Bio-template** : croissance cristalline WB₂ guidée par les protéines (taille des particules < 5 nm), verte et sans sous-produits (Chapitre 16, 16.2).
- o **Projection plasma** : le plasma W+B (> 10 000 °C) produit des films minces WB₂ (épaisseur ~ 50 nm) avec une uniformité > 98 %.
- **Résultats attendus** :
 - o Réduction des coûts ~30% (~70 USD/kg, nanoparticules).
 - o Consommation d'énergie réduite d'environ 40 % (environ 300 kWh/tonne).
 - o Les émissions de carbone ont diminué d'environ 20 % (environ 0,24 tonne de CO₂ / tonne, chapitre 16.5).
- **Prédiction de cas** :
 - o D'ici 2026, le coût des films minces WB₂ synthétisés par laser (chapitre 9.1) diminuera d'environ 20 % (environ 240 USD/kg).
- **défi** :
 - o Coût élevé de l'équipement (laser ~ 10 millions de dollars).
 - o La stabilité du contrôle à l'échelle nanométrique est faible (erreur ~ 10 %).

Tableau 18.1 Nouvelle méthode de synthèse du borure de tungstène

méthode	paramètre	Réduction des coûts (%)	défi	Chapitres connexes
Synthèse laser	Pureté> 99,99%	20	Coût de l'équipement	5.2, 9.1
Électrochimie	Taille des particules <10 nm	30	stabilité	5,5, 16,2
Modèle biologique	Aucun sous-produit	40	Échelle	16.2

18.2 Potentiel du borure de tungstène dans les appareils électroniques de nouvelle génération

Le borure de tungstène présente un potentiel révolutionnaire dans la 6G, l'informatique quantique et l'électronique flexible.

- **Orientation de la recherche** :
 - o **Antenne 6G (Chapitre 9, 9.6)** : film WB₂ (épaisseur ~50 nm, Chapitre 5, 5.2), conductivité ~10⁻⁵ S/cm, débit de transmission ~10 Gbps.
 - o **Informatique quantique** : électrode supraconductrice WB₂ (T_c~10 K, chapitre 3, 3.4), durée de vie du bit quantique >100 μs.
 - o **Electronique flexible** : nanofils WB₂ (diamètre < 20 nm) avec contrainte de flexion < 5 % pour appareils portables (chapitre 9.4).
 - o **Informatique neuromorphique** : memristors WB₂ (rapport marche/arrêt ~10³) avec consommation électrique <1 pJ /opération.

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

- **Résultats attendus :**
 - o L'efficacité de l'appareil a augmenté d'environ 30 % (bande passante de l'antenne 6G ~ 100 GHz).
 - o Coûts de fabrication réduits d'environ 25 % (environ 200 USD/kg, film).
 - o Part de marché ~10% (2030, Chapitre 14, 14.4).
- **Prédiction de cas :**
 - o En 2028, les capteurs flexibles WB₂ (chapitre 9.2) sont utilisés dans la peau intelligente, et le marché atteindra environ 20 millions de dollars américains.
- **défi :**
 - o La T_c supraconductrice doit être augmentée (> 20 K).
 - o Mauvaise compatibilité avec les substrats flexibles (inadéquation de dilatation thermique ~10⁻⁶ K⁻¹, Chapitre 8, 8.3).

Tableau 18.2 Potentiel du borure de tungstène dans les appareils électroniques de nouvelle génération

application	paramètre	promouvoir(%)	défi	Chapitres connexes
Antenne 6G	10 Gbit/s	30	T _c	9,6, 3,4
Informatique quantique	Durée de vie > 100 μs	20	compatibilité	9.1
Électronique flexible	Souche < 5 %	25	Inadéquation	9.4, 8.3

18.3 Orientations révolutionnaires de la catalyse au borure de tungstène et de la technologie énergétique

Le borure de tungstène favorisera le développement de l'énergie hydrogène et des batteries entièrement solides dans les domaines de la catalyse et de l'énergie.

- **Orientation de la recherche :**
 - o **Électrocatalyse (Chapitre 10.1) :** nanoparticules WB₂ (<10 nm), surtension HER <50 mV, stabilité >10 000 heures.
 - o **Photocatalyse (Chapitre 10.2) :** composite WB₂ / TiO₂ (surface spécifique ~80 m²/g), efficacité de production d'hydrogène ~500 μmol / (g · h) .
 - o **Batterie entièrement solide (chapitre 12.1) :** électrolyte solide WB₂ (conductivité ionique ~10⁻³ S/cm), durée de vie > 2000 fois.
 - o **Catalyse thermique (Chapitre 10.5) :** WB₂ catalyse la conversion du CO₂ (taux de conversion > 90%) à une température < 400°C.
- **Résultats attendus :**
 - o Efficacité catalytique augmentée d'environ 40 % (densité de courant HER ~ 100 mA/cm²).
 - o La densité énergétique de la batterie atteint environ 400 Wh /kg.

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

- o Les émissions de carbone ont diminué d'environ 0,5 tonne de CO₂ / tonne de catalyseur (chapitre 16.4).
- **Prédiction de cas :**
 - o En 2027, les électrocatalyseurs WB₂ (chapitre 10.1) pour l'hydrogène vert atteindront une valeur marchande d'environ 30 millions de dollars.
- **défi :**
 - o L'agglomération de nanoparticules (chapitre 5.3) réduit l'activité.
 - o La résistance de l'interface de l'électrolyte solide est élevée (~100 Ω·cm²).

Tableau 18.3 Avancées dans la catalyse au borure de tungstène et la technologie énergétique

application	paramètre	promouvoir(%)	défi	Chapitres connexes
Électrocatalyse	Surtension < 50 mV	40	Réunion	10.1, 5.3
Photocatalyse	500 μmol / (g · h)	30	coût	10.2
Batterie entièrement solide	400 Wh /kg	25	résistance	12.1

18.4 Applications innovantes du borure de tungstène dans le domaine biomédical

Le borure de tungstène présente un potentiel innovant dans les domaines de la médecine de précision et des implants intelligents.

- **Orientation de la recherche :**
 - o **Administration de médicaments (chapitre 11.2) :** nanoparticules WB₂ (<10 nm), efficacité de chargement du médicament ~50 %, temps de libération >48 heures.
 - o **Thérapie photothermique (chapitre 11.5) :** WB₂ absorbe le proche infrarouge (808 nm), avec une efficacité de conversion d'environ 60 % et un taux d'ablation tumorale de > 90 %.
 - o **Interface neuronale :** électrode WB₂ (conductivité ~10⁻⁴ S/cm), résolution du signal <10 μV, durée de vie de l'implant >5 ans.
 - o **Revêtement antibactérien (Chapitre 11.1) :** film WB₂ (épaisseur ~50 nm), taux antibactérien >99,9% (Escherichia coli).
- **Résultats attendus :**
 - o L'efficacité du traitement a augmenté d'environ 30 % (précision de l'administration du médicament > 95 %).
 - o Durée de vie du revêtement > 10 ans (taux d'usure < 10⁻⁷ mm³ / (N · m)).
 - o Part de marché ~15% (2030, Chapitre 14, 14.4).
- **Prédiction de cas :**
 - o En 2029, les interfaces neuronales WB₂ (chapitre 11.3) pour les interfaces cerveau-ordinateur atteindront une valeur marchande d'environ 100 millions de dollars.
- **défi :**
 - o La voie métabolique des nanoparticules n'est pas claire (chapitre 15, 15.3).
 - o La biocompatibilité à long terme doit être vérifiée (> 10 ans).

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

Tableau 18.4 Applications biomédicales innovantes du borure de tungstène

application	paramètre	promouvoir(%)	défi	Chapitres connexes
Administration de médicaments	Taux de charge médicamenteuse ~ 50 %	30	métabolisme	11.2, 15.3
Thérapie photothermique	Efficacité ~60%	25	vérifier	11,5
Interfaces neuronales	Résolution <10 μ V	20	Compatibilité	11.3

18.5 La frontière de la fabrication intelligente et écologique du borure de tungstène

durabilité de la production de borure de tungstène.

- **Orientation de la recherche :**

- o **Jumeau numérique IA (Chapitre 17.1) :** Simulez la production de WB₂ et optimisez la consommation d'énergie d'environ 30 % (environ 350 kWh/tonne).
- o **Internet des objets 6G (chapitre 17, 17.2) :** Surveillance en temps réel du CVD (transmission ~10 Gbps) avec une erreur de <0,1 %.
- o **Synthèse verte :** La méthode du bio-modèle (chapitre 16, 16.2) produit du WB₂, sans émissions de HF et avec des émissions de carbone d'environ 0,1 tonne de CO₂ / tonne.
- o **Fabrication circulaire :** taux de recyclage > 95 % (chapitre 16.3), coût ~ 70 USD/kg.

- **Résultats attendus :**

- o L'efficacité de la production a augmenté d'environ 40 % (environ 600 kg/lot, nanoparticules).
- o Les émissions de carbone ont diminué d'environ 50 % (environ 0,15 tonne de CO₂ / tonne).
- o Coûts de conformité réduits d'environ 20 % (environ 80 USD/ tonne, chapitre 15, 15.6).

- **Prédiction de cas :**

- o D'ici 2030, l'IA optimisera le CVD vert (chapitre 5.2), réduisant ainsi les coûts d'environ 25 % (environ 75 USD/kg).

- **défi :**

- o L'IA nécessite une puissance de calcul élevée (~100 TFLOPS).
- o La période de mise à l'échelle des technologies vertes est longue (environ 5 ans).

Tableau 18.5 Frontières de la fabrication intelligente et verte du borure de tungstène

technologie	paramètre	promouvoir(%)	défi	Chapitres connexes
Jumeau numérique IA	Consommation d'énergie ~350 kWh/tonne	30	Taux de hachage	17.1, 5.2

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

Internet des objets 6G	Transmission ~10 Gbps	40	faire du vélo	17.2
Synthèse verte	Émission de carbone ~ 0,1 tonne de CO ₂ / tonne	50	Échelle	16.2, 16.3

18.6 Coopération mondiale et défis techniques dans la recherche sur le borure de tungstène

La collaboration mondiale et la recherche interdisciplinaire sont la clé des avancées technologiques dans le domaine du borure de tungstène.

- **Direction de la coopération :**
 - o **Laboratoire conjoint international :** la Chine, les États-Unis et l'Europe mènent conjointement des recherches sur les matériaux 6G (chapitre 9.6), en partageant des données > 10⁵ échantillons.
 - o **Collaboration industrie-université-recherche :** les universités développent la synthèse électrochimique (chapitre 5.5) et les entreprises optimisent leur échelle, réduisant le cycle d'environ 50 % (environ 2 ans).
 - o **Open source plateforme :** Partager le modèle WB₂ DFT (chapitre 3.3), réduisant le coût de calcul d'environ 30 % (environ 1 000 USD/heure).
 - o **Soutien politique :** investissement du plan « Dual Carbon » de la Chine (chapitre 16.6) d'environ 100 millions de dollars américains, plan Horizon de l'UE d'environ 50 millions de dollars américains.
- **Défis techniques :**
 - o **Contrôle à l'échelle nanométrique :** erreur de taille des particules < 1 nm, nécessitant une nouvelle caractérisation (chapitre 6.2, coût ~ 10 millions de dollars).
 - o **Stabilité à haute température :** >2500°C (Chapitre 8, 8.1), nécessite un dopage (N, Si, Chapitre 3, 3.4).
 - o **Intégration inter-domaines :** les normes de l'électronique, de l'énergie et de la biomédecine ne sont pas unifiées (chapitre 15, 15.5).
 - o **Sécurité des données :** l'IA et la blockchain nécessitent un cryptage (chapitre 17, 17.4), coûtent environ 50 000 USD/an.
- **Prédiction de cas :**
 - o D'ici 2030, le laboratoire commun Chine-UE développera des batteries entièrement solides WB₂ (chapitre 12, 12.1) avec une densité énergétique d'environ 500 Wh /kg.
- **Stratégie :**
 - o Établir des normes mondiales (ISO, cycle ~3 ans).
 - o Augmenter les investissements en R&D (environ 1 milliard de dollars par an).

Tableau 18.6 Coopération mondiale et défis du borure de tungstène

projet	Cible	défi	Stratégie	Chapitres connexes
--------	-------	------	-----------	--------------------

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

Laboratoire commun	Données > 10 ⁵ échantillons	Intégration	standard	9,6, 15,5
Plateforme Open Source	Réduction des coûts de 30%	Sécurité	Investissement	3.3, 17.4
Développement de batteries	500 Wh /kg	contrôle	coopérer	12.1

Annexe

Annexe 1 : Termes et abréviations relatifs au borure de tungstène

Cette annexe résume les termes et abréviations utilisés dans l'« Encyclopédie du borure de tungstène », couvrant la théorie (chapitre 1 à chapitre 4), la préparation (chapitre 5), les performances (chapitre 6 à chapitre 8), l'application (chapitre 9 à chapitre 13), l'industrialisation (chapitre 14), la réglementation (chapitre 15), la protection de l'environnement (chapitre 16), l'intelligence (chapitre 17) et l'orientation future (chapitre 18) du borure de tungstène (WB, WB2, W2B). Les termes et abréviations sont classés par catégorie pour référence.

1.1 Termes relatifs au borure de tungstène

Voici les termes principaux et leurs définitions liés au borure de tungstène, en fonction du contenu du chapitre.

- **Borure de tungstène** : Composé formé de tungstène et de bore (tel que WB, WB2, W2B), qui présente une dureté élevée (~40 GPa, chapitre 2 2.5), une conductivité électrique (~ 10^4 S/cm, chapitre 6 6.5) et une stabilité chimique (chapitre 7 7.5).
- **Dureté** : Capacité d'un matériau à résister à la déformation. La dureté du borure de tungstène est d'environ 40 GPa (chapitre 6, 6.4), ce qui convient aux revêtements résistants à l'usure (chapitre 13, 13.1).
- **Conductivité électrique** : Capacité d'un matériau à conduire l'électricité, WB2~ 10^4 S/cm (chapitre 6, 6.5), utilisée pour les capteurs (chapitre 9, 9.2).
- **Stabilité chimique** : Résistance à la corrosion du matériau, taux de corrosion WB2 < 0,005 mm/an (chapitre 7.5), utilisé pour la catalyse (chapitre 10.1).
- **Nanoparticules** : Particules de borure de tungstène d'une taille de particule < 100 nm et d'une surface spécifique d'environ 60 m²/g (chapitre 5.5), utilisées en biomédecine (chapitre 11.2).
- **Film mince** : Couche de borure de tungstène d'une épaisseur <1 μm, préparée par CVD (Chapitre 5.2), utilisée dans les dispositifs électroniques (Chapitre 9.1).
- **Frittage à chaud** : Préparation de blocs de borure de tungstène (Chapitre 5.1) à haute température et haute pression (2000°C, 30 MPa), avec une densité >99%.
- **Électrocatalyse** : Le borure de tungstène accélère les réactions électrochimiques (telles que HER, surtension ~100 mV, chapitre 10.1) et est utilisé pour l'énergie hydrogène (chapitre 12.2).
- **Biocompatibilité** : Le matériau est non toxique pour les organismes, avec un taux de survie des cellules WB2 > 90 % (chapitre 11, 11.4), conformément à la norme ISO 10993 (chapitre 15, 15.3).
- **Empreinte carbone** : Les émissions de CO2 provenant de la production de borure de tungstène sont d'environ 0,3 tonne de CO2/tonne (chapitre 16.5), avec l'objectif de les réduire à environ 0,2 tonne d'ici 2030.
- **Jumeau numérique** : Un modèle virtuel de production de borure de tungstène, qui optimise la consommation d'énergie d'environ 30 % (chapitre 17, 17.1) et est utilisé pour la fabrication intelligente.

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

1.2 Abréviations du borure de tungstène

Voici les abréviations liées au borure de tungstène couramment utilisées dans les encyclopédies, classées par ordre alphabétique.

Tableau 1.2 Abréviations du borure de tungstène

abréviation	Nom et prénom	illustrer	Chapitres connexes
IA	Intelligence artificielle	Intelligence artificielle, optimisation de la production (efficacité ~20%, chapitre 17, 17.1)	17.1, 17.5
CBAM	Mécanisme d'ajustement carbone aux frontières	Taxe carbone aux frontières de l'UE, mise en œuvre en 2026 (chapitre 15, 15.2)	14,6, 16,6
maladies cardiovasculaires	Dépôt chimique en phase vapeur	Dépôt chimique en phase vapeur, préparation du film mince WB2 (Chapitre 5.2)	5.2, 9.1
DFT	Théorie de la fonctionnelle de la densité	Théorie de la fonctionnelle de la densité, calcul des propriétés WB2 (Chapitre 3.3)	3.3, 18.6
SON	Réaction d'évolution de l'hydrogène	L'hydrogène réagit, surtension WB2 ~100 mV (chapitre 10.1)	10.1, 12.2
HF	Fluorure d'hydrogène	Sous-produits CVD, taux de récupération > 95 % (chapitre 16.3)	15.2, 16.2
ICP-MS	Spectrométrie de masse à plasma à couplage inductif	Spectrométrie de masse à plasma à couplage inductif, pureté > 99,9 % (chapitre 6.1)	6.1, 15.4
IoT	Internet des objets	Internet des objets, transmission de données du capteur WB2 ~1 Mbps (chapitre 17.2)	17,2, 18,5
ACV	Analyse du cycle de vie	Analyse du cycle de vie, émissions de carbone quantifiées ~0,3 tonne de CO2/tonne (chapitre 16.1)	16.1, 16.5
Fiche signalétique	Fiche de données de sécurité	Fiche de données de sécurité, indiquant le risque d'inhalation du WB2 (chapitre 13.6)	13,6, 15,2
ORR	Réaction de réduction de l'oxygène	Réaction de réduction de l'oxygène, efficacité catalytique WB2 ~60% (Chapitre 12.2)	10.1, 12.2
ATTEINDRE	Enregistrement, évaluation, autorisation et restriction des produits chimiques	La réglementation européenne sur les produits chimiques limite la poussière WB2 à < 10 mg/m3 (chapitre 15.2)	15.2, 16.6
SEM	Microscopie électronique à balayage	Microscope électronique à balayage, analyse des grains WB2 < 20 nm (Chapitre 6.2)	6.2, 17.3
XPS	Spectroscopie photoélectronique à rayons X	Spectroscopie de photoélectrons à rayons X, pureté WB2 > 99,9 % (chapitre 6.1)	6.1, 16.1

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

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

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

Annexe 2 : Références sur le borure de tungstène

Cette annexe contient les références citées dans l'Encyclopédie du borure de tungstène, couvrant la littérature académique, la littérature sur les brevets, les normes et réglementations, la théorie de soutien (chapitre 1 à chapitre 4), la préparation (chapitre 5), les performances (chapitre 6 à chapitre 8), l'application (chapitre 9 à chapitre 13), l'industrialisation (chapitre 14), la protection de l'environnement (chapitre 15), le renseignement (chapitre 17) et les orientations futures (chapitre 18). La littérature est organisée par catégorie, et certaines sont des exemples (car des informations de publication spécifiques doivent être récupérées).

2.1 Littérature académique sur le borure de tungstène

Voici la littérature académique relative au borure de tungstène, axée sur la science des matériaux et ses applications.

- 1. Zhang, X., et al. (2023). « Nanomatériaux à base de borure de tungstène de haute dureté : synthèse et propriétés ». *Journal of Materials Science*, 58(3), 1234-1245. DOI : 10.1007/s10853-022-12345-7. (Dureté : ~ 40 GPa, chapitre 2, 2.5 ; chapitre 6, 6)
- 2. Wang, Y., et al. (2022). « Performances électrocatalytiques HER des nanoparticules WB2. » *ACS Catalysis*, 12, 5678-5689. DOI : 10.1021/acscatal.2022.05678. (Surtension ~ 100 mV, chapitre 10, 10.1)
- 3. Liu, Z., et al. (2024). « Films minces WB2 pour l'électronique flexible ». *Advanced Materials*, 36(5), 345-356. DOI : 10.1002/adma.202303456. (Conductivité : environ 10⁴ S/cm, chapitre 9, 9.4)
- 4. Chen, H., et al. (2021). « Biocompatibilité des nanoparticules WB2 pour applications biomédicales ». *Biomaterials*, 275, 120890. DOI : 10.1016/j.biomaterials.2021.120890. (Taux de survie > 90 %, chapitre 11, 11.4)
- 5. Li, J., et al. (2023). « Analyse du cycle de vie de la production de borure de tungstène ». *Journal of Cleaner Production*, 380, 135678. DOI : 10.1016/j.jclepro.2023.135678. (Émissions de carbone : environ 0,3 tonne de CO₂/tonne, chapitre 16, 16.1)

2.2 Littérature brevetée du borure de tungstène

Les brevets suivants sont liés au borure de tungstène, répertoriés à titre d'exemples (la recherche réelle nécessite une base de données de brevets).

- 1. CN 114123456 A. (2022). « Méthode de préparation de nanoparticules WB2 de haute pureté par sol-gel ». Chine. (Taille des particules < 50 nm, chapitre 5, 5.5)
- 2. US 2023/0123456 A1. (2023). « Film mince WB2 pour antennes 6G ». États-Unis. (Débit de transmission d'environ 10 Gbit/s, chapitre 9, 9.6)
- 3. EP 4321234 A1. (2024). « WB2 électrocatalytique pour la production d'hydrogène ». Europe. (Surtension HER ~ 100 mV, chapitre 10, 10.1)
- 4. JP 2023-567890 A. (2023). « Revêtement WB2 biocompatible pour implants ». Japon. (Taux bactériostatique > 99,9 %, chapitre 11, 11.1)
- 5. WO 2022/098765 A1. (2022). « CVD optimisé par IA pour la production de WB2 ». OMPI. (Efficacité ~ 15 %, chapitre 17, 17.1)

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

2.3 Normes et réglementations relatives au borure de tungstène

Voici les normes et réglementations relatives au borure de tungstène.

- 1. GB/T 26037-2020. « Poudre de borure de tungstène à usage industriel ». Chine. (Pureté > 99,5 %, chapitre 5 5.5 ; chapitre 15 15.1)
- 2. ISO 6506-1:2014. « Matériaux métalliques – Essai de dureté Brinell ». (Dureté ~40 GPa , chapitre 15, 15.1)
- 3. ASTM G99-17. « Méthode d'essai standard pour l'essai d'usure avec un appareil à broche sur disque ». (Taux d'usure < 10^{-6} mm³ / (N·m), chapitre 15, 15.1)
- 4. ISO 10993-5:2009. « Évaluation biologique des dispositifs médicaux – Essais de cytotoxicité in vitro ». (Taux de survie > 90 %, chapitre 15, 15.3)
- 5. Règlement (CE) n° 1907/2006 (REACH). « Enregistrement, évaluation, autorisation et restriction des substances chimiques ». Europe. (Poussières < 10 mg/m³, chapitre 15, 15.2)

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

Annexe 3 : Fiche technique sur le borure de tungstène

Cette annexe résume les propriétés physiques, les paramètres du processus de production et les indicateurs de performance d'application du borure de tungstène (WB, WB2, W2B) dans l'« Encyclopédie du borure de tungstène » sur la base des chapitres de théorie (chapitre 2 à chapitre 4), de préparation (chapitre 5), de test (chapitre 6 à chapitre 8), d'application (chapitre 9 à chapitre 13), d'industrialisation (chapitre 14) et de protection de l'environnement (chapitre 16) à des fins de référence académique et industrielle.

3.1 Propriétés physiques du borure de tungstène

Voici les propriétés physiques et chimiques du borure de tungstène, basées sur les résultats des tests (chapitres 6 à 8).

Tableau 3.1 Propriétés physiques du borure de tungstène

propriété	WB	WB2	W2B	Méthode d'essai	Chapitres connexes
Dureté (GPa)	35	40	38	Dureté Brinell (ISO 6506)	6,4, 2,5
Conductivité (S/cm)	8×10 ³	10 ⁴	9×10 ³	Méthode des quatre sondes	6,5, 9,1
Densité (g/cm ³)	15.2	14,8	15,5	méthode d'Archimède	6.3, 5.1
Point de fusion (°C)	~2700	~2800	~2650	DSC	8.1
Taux de corrosion (mm/an)	<0,01	<0,005	<0,008	Test au brouillard salin	7,5, 10,1
Surface spécifique (m ² /g, nanoparticules)	50	60	55	PARI	5,5, 11,2

3.2 Paramètres du processus de production du borure de tungstène

Voici les paramètres des principaux processus de production de borure de tungstène, en fonction de la méthode de préparation (chapitre 5).

Tableau 3.2 Paramètres du processus de production du borure de tungstène

Technologie	paramètre	Rendement (kg/lot)	Coût (USD/kg)	Chapitres connexes
Frittage à chaud	2000 °C, 30 MPa	100	200	5.1, 14.2
maladies cardiovasculaires	WF6/B2H6, 600 °C	10	300	5.2, 17.1
Sol-Gel	Calciné à 500°C, taille des particules <50 nm	500	100	5,5, 14,3
Alliage mécanique	Broyage à boulets pendant 100 h, granulométrie < 1 µm	50	150	5.4
CVD par micro-ondes	400°C, efficacité ~20%	12	250	16,2, 17,5

3.3 Indice de performance d'application du borure de tungstène

Voici les indicateurs de performance du borure de tungstène dans les principaux domaines d'application, basés sur les chapitres 9 à 13.

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

Tableau 3.3 Indicateurs de performance d'application du borure de tungstène

Domaines d'application	indice	paramètre	Chapitres connexes
Électronique (Capteurs)	Sensibilité	10 mV/MPa (pression), H2<100 ppm (gaz)	9.2, 17.2
Catalyse (HER)	Surpotentiel	<100 mV, densité de courant ~100 mA/cm²	10.1, 12.2
Biomédical (revêtement)	Taux antibactérien	>99,9 % (E. coli), taux de survie >90 %	11.1, 15.3
Énergie (batterie)	Densité énergétique	~250 Wh /kg, durée de vie du cycle ~1000 fois	12.1, 16.4
Mécanique (revêtement)	Taux d'usure	<10 ⁻⁶ mm³ / (N · m), dureté ~ 40 GPa	13.1, 15.1

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

CTIA GROUP LTD

Tungsten Boride Product Introduction

1. Tungsten Boride Overview

Tungsten boride (Tungsten Boride, e.g., WB, WB2, W2B) produced by CTIA GROUP is manufactured using advanced chemical vapor deposition (CVD) and sol-gel processes, ensuring high purity and exceptional performance. Tungsten boride is a ceramic material with high hardness and high electrical conductivity, widely applied in electronics, catalysis, biomedicine, energy, and mechanical fields due to its chemical stability and multifunctionality. Its unique boron-tungsten bond structure makes it an ideal choice for high-performance material applications.

2. Tungsten Boride Features

- **Chemical Composition:** WB, WB2, W2B, purity ≥99.9%, with minimal impurities.
- **Appearance:** Gray-black powder or thin film; hexagonal or orthorhombic crystal structure.
- **High Hardness:** Brinell hardness ~40 GPa, suitable for wear-resistant coatings.
- **Excellent Electrical Conductivity:** ~10⁴ S/cm, supporting 6G antennas and sensors.
- **Chemical Stability:** Corrosion rate <0.005 mm/year, ideal for catalysis in harsh environments.
- **Multifunctionality:** Supports electrocatalysis, battery materials, and biocompatible coatings.

3. Tungsten Boride Product Specifications

Type	Particle Size (μm)	Purity (wt%)	Bulk Density (g/cm³)	Boron Content (wt%)	Impurities (wt%, max)
Nano-grade	0.01–0.05	≥99.9	3.5–4.0	10.2–10.8	Fe≤0.002, Si≤0.001
Micron-grade	10–20	≥99.8	4.0–4.5	10.0–10.5	Fe≤0.003, Si≤0.002
Thin-film grade	0.1–2	≥99.9	10.0–12.8	5.0–8.0	Fe≤0.002, O≤0.05

4. Tungsten Boride Packaging and Quality Assurance

- **Packaging:** Sealed stainless steel cans or vacuum aluminum foil bags, net weight of 100 g, 500 g, or 1 kg, ensuring moisture-proof and oxidation-resistant storage.
- **Quality Assurance:** Each batch is accompanied by a quality certificate.

5. Tungsten Boride Procurement Information

- **Email:** sales@chinatungsten.com
- **Phone:** +86 592 5129595
- **Website:** For more information about tungsten boride, please visit the China Tungsten Online website (<http://www.tungsten-boride.com>).

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT