

# Encyclopédie du bronze au césium et au 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](http://www.ctia.com.cn)

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

## PRÉSENTATION DU GROUPE CTIA

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

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

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

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



### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

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

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

## Cesium Tungsten Bronze Product Introduction

CTIA GROUP LTD

### 1. Cesium Tungsten Bronze Overview

Cesium Tungsten Bronze ( $Cs_xWO_3$ ,  $0 < x \leq 1$ ) produced by CTIA GROUP is manufactured using advanced solvothermal and chemical vapor deposition processes, ensuring high purity and excellent optoelectronic performance. Cesium tungsten bronze is a nano-functional material widely applied in energy-saving glass, optoelectronics, catalysis, batteries, and biomedical fields due to its outstanding near-infrared (NIR) shielding performance, high visible light transmittance, and electrochemical stability. Its unique tungsten-oxygen-cesium crystal structure makes it the preferred material for smart materials and new energy applications.

### 2. Cesium Tungsten Bronze Features

Chemical composition:  $Cs_xWO_3$  ( $x = 0.2-0.33$ ), purity  $\geq 99.9\%$ , extremely low impurities.

Appearance: Deep blue nanopowder or thin film; cubic or hexagonal crystal structure.

Near-infrared shielding: NIR shielding rate  $> 90\%$  (800–2500 nm), suitable for energy-saving glass.

Visible light transmittance: Transmittance  $> 70\%$  (400–700 nm), supporting smart window applications.

Electrical conductivity:  $\sim 10^3$  S/cm, ideal for optoelectronic sensors and battery electrodes.

Chemical stability: Corrosion rate  $< 0.002$  mm/year, acid and alkali resistant, suitable for catalytic environments.

Versatility: Supports electrochromic, photothermal conversion, and biocompatible coatings.

### 3. Cesium Tungsten Bronze Product Specifications

Type	Particle Size (nm)	Purity (wt%)	Bulk Density (g/cm <sup>3</sup> )	Cesium Content (wt%)	Impurities (wt%, Max)
Nano-grade	30–50	$\geq 99.9$	2.5–3.0	5.0–8.0	Fe $\leq 0.002$ , Si $\leq 0.001$ , O $\leq 0.05$

### 4. Cesium Tungsten Bronze 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 anti-oxidation storage.

Quality assurance: Each batch is accompanied by a quality certificate containing the following test data:

- Purity (ICP-MS,  $> 99.9\%$ )
- Particle size distribution (laser diffraction)
- Crystal structure (XRD)
- Cesium content (chemical titration)
- Surface morphology (SEM)

### 5. Cesium Tungsten Bronze Procurement Information

Email: [sales@chinatungsten.com](mailto:sales@chinatungsten.com)

Phone: +86 592 5129595

Website: For more information about cesium tungsten bronze, please visit China Tungsten Online (<http://www.cesium-tungsten-bronze.com/>).

#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

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

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

## Table des matières

### Chapitre 1 : Introduction et histoire du bronze au césium et au tungstène

- 1.1 Définition et composition chimique du bronze au césium tungstène
- 1.2 Découverte et développement du bronze au césium tungstène
- 1.3 Statut du bronze au césium tungstène dans la science des matériaux
- 1.4 État de la recherche mondiale et aperçu du marché du bronze au césium tungstène
- 1.5 Principaux domaines d'application du bronze au césium tungstène

### Chapitre 2 : Structure cristalline et propriétés du bronze au césium et au tungstène

- 2.1 Structure cristalline et caractéristiques de liaison chimique du bronze au césium tungstène
- 2.2 Propriétés optiques du bronze au césium tungstène : absorption dans le proche infrarouge et transmission de la lumière
- 2.3 Propriétés électriques du bronze au césium tungstène : conductivité et migration des porteurs
- 2.4 Propriétés thermiques du bronze au césium tungstène : conductivité thermique et stabilité
- 2.5 Calcul théorique et prédiction des performances du bronze au césium tungstène

### Chapitre 3 : Méthode de synthèse du bronze au césium et au tungstène

- 3.1 Méthode de réaction à l'état solide du bronze au césium tungstène
- 3.2 Méthodes solvothermales et hydrothermales du bronze au césium tungstène
- 3.3 Dépôt chimique en phase vapeur (CVD) du bronze au césium tungstène
- 3.4 Méthode sol-gel du bronze au césium tungstène
- 3.5 Synthèse verte et contrôle des nanoparticules du bronze au césium tungstène

### Chapitre 4 : Technologie de caractérisation du bronze au césium et au tungstène

- 4.1 Diffraction des rayons X (DRX) et analyse cristalline du bronze au césium tungstène
- 4.2 Microscopie électronique à balayage (MEB) et microscopie électronique à transmission (MET) du bronze au césium tungstène
- 4.3 Spectroscopie de photoélectrons X (XPS) et état chimique du bronze au césium tungstène
- 4.4 Spectroscopie UV-Vis-NIR du bronze au césium tungstène
- 4.5 Méthodes d'essai électrique et thermique du bronze au césium tungstène

### Chapitre 5 : Applications optiques et thermiques du bronze au césium et au tungstène

- 5.1 Film pour fenêtre intelligent en bronze de tungstène-césium et verre à économie d'énergie
- 5.2 Revêtement de protection proche infrarouge en bronze de tungstène-césium
- 5.3 Conversion lumière-chaaleur et utilisation de l'énergie solaire en bronze de tungstène-césium
- 5.4 Capteurs et détecteurs optiques en bronze de tungstène-césium
- 5.5 Matériaux de gestion thermique en bronze de tungstène-césium

### Chapitre 6 : Applications énergétiques et environnementales du bronze au césium et au tungstène

- 6.1 Batteries lithium-ion et supercondensateurs en bronze au césium tungstène

#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

- 6.2 Photocatalyse et décomposition aqueuse du bronze au césium tungstène
- 6.3 Purification de l'air et adsorption des polluants du bronze au césium tungstène
- 6.4 Matériaux d'électrodes pour piles à combustible en bronze au césium tungstène
- 6.5 Stockage d'hydrogène et stockage d'énergie du bronze au césium tungstène

### **Chapitre 7 : Production industrielle de bronze au césium et au tungstène**

- 7.1 Procédé et équipement de production du bronze au césium tungstène
- 7.2 Chaîne d'approvisionnement en matières premières et analyse des coûts du bronze au césium tungstène
- 7.3 Technologie de production à grande échelle du bronze au césium tungstène
- 7.4 Contrôle qualité et tests du bronze au césium tungstène
- 7.5 Cas d'application du marché du bronze au césium tungstène

### **Chapitre 8 : Normes et réglementations relatives au bronze au césium et au tungstène**

- 8.1 Normes internationales et nationales pour le bronze au césium tungstène (ISO, GB/T)
- 8.2 Réglementations environnementales et de sécurité pour le bronze au césium tungstène (REACH, RoHS)
- 8.3 Évaluation des risques liés aux nanomatériaux pour le bronze au césium tungstène
- 8.4 Exigences en matière de santé et de sécurité au travail pour le bronze au césium tungstène
- 8.5 Certification et conformité des produits pour le bronze au césium tungstène
- 8.6 Fiche de données de sécurité (FDS) du bronze au césium tungstène de CTIA GROUP LTD

### **Chapitre 9 : Durabilité et impact environnemental du bronze au césium et au tungstène**

- 9.1 Évaluation de l'impact environnemental du procédé de production de bronze au césium tungstène
- 9.2 Technologie de fabrication verte du bronze au césium tungstène
- 9.3 Traitement des déchets et recyclage du bronze au césium tungstène
- 9.4 Empreinte carbone et stratégie de réduction des émissions du bronze au césium tungstène
- 9.5 Moteurs politiques pour le développement durable du bronze au césium tungstène

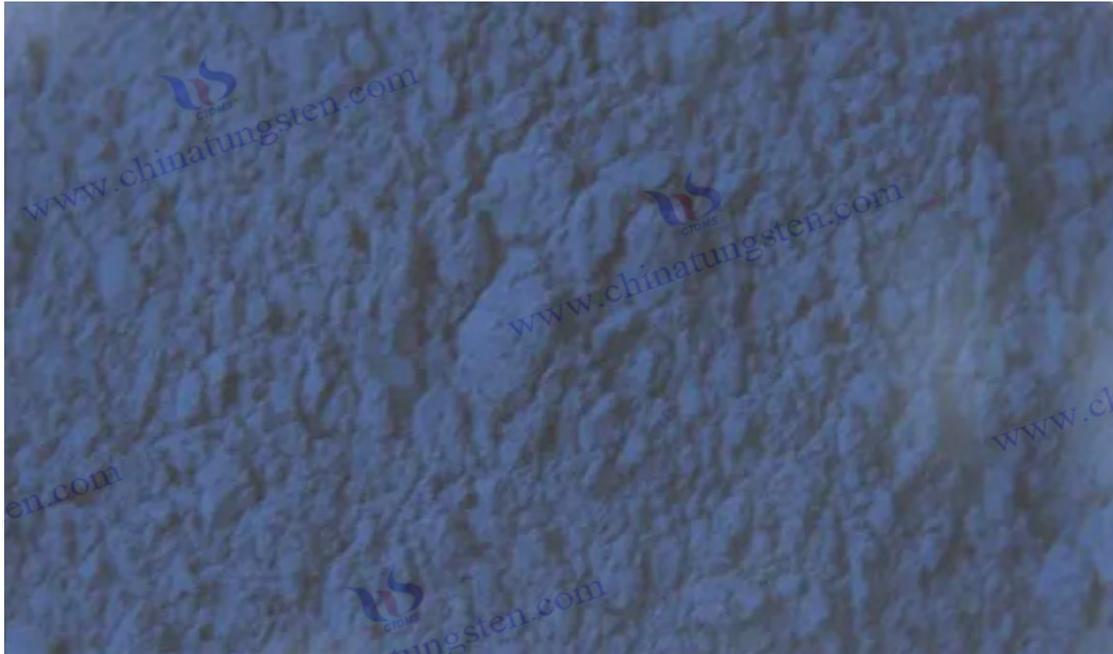
### **Chapitre 10 : Recherches futures et perspectives du bronze au césium et au tungstène**

- 10.1 Exploration de nouvelles méthodes de synthèse pour le bronze au césium tungstène
- 10.2 Potentiel pour les applications de nouvelle génération du bronze au césium tungstène
- 10.3 Intégration de technologies intelligentes et numériques pour le bronze au césium tungstène
- 10.4 Coopération mondiale et défis techniques pour le bronze au césium tungstène
- 10.5 Tendances de développement futures et suggestions pour le bronze au césium tungstène

### **Annexe**

- Annexe 1 : Termes et abréviations du bronze au césium tungstène
- Annexe 2 : Références du bronze au césium tungstène
- Annexe 3 : Fiche technique du bronze au césium tungstène

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



## Chapitre 1 : Introduction et histoire du bronze au césium et au tungstène

Le bronze au césium tungstène ( $CsxWO_3$ ,  $0 < x \leq 1$ ) est un nanomatériau fonctionnel qui présente un fort potentiel en matière de conservation d'énergie, de protection de l'environnement, d'électronique et d'énergie grâce à son excellente absorption dans le proche infrarouge ( $\sim 70\%$  à  $1\ 000\text{ nm}$ ), sa conductivité élevée ( $\sim 10^3\text{ S/cm}$ ) et sa stabilité chimique. Ce chapitre présente la définition et la composition chimique du bronze au césium tungstène, l'historique de sa découverte et de son développement, sa place dans la science des matériaux, l'état de la recherche mondiale et l'aperçu du marché, ainsi que ses principaux domaines d'application, fournissant ainsi le contexte des chapitres suivants (du chapitre 2 au chapitre 10). Cette encyclopédie vise à expliquer systématiquement les bases théoriques, la technologie de préparation, la caractérisation des performances, les scénarios d'application, l'industrialisation, les exigences réglementaires, la durabilité et les orientations futures du bronze au césium tungstène.

### 1.1 Bronze au césium et au tungstène

Le bronze au césium et au tungstène est un oxyde à base de tungstène dont la formule chimique est  $CsxWO_3$ , où  $x$  représente le rapport de dopage du césium (Cs), généralement compris entre 0 et 1. Le  $CsxWO_3$  appartient à la famille des bronzes au tungstène et sa structure est composée d'octaèdres  $WO_6$ , avec des ions césium insérés dans les espaces octaédriques pour former une structure cristalline hexagonale ou cubique (chapitre 2.1). La variation de la valeur de  $x$  affecte significativement les performances du matériau. Par exemple, lorsque  $x \sim 0,32$ , le  $Cs_{0,32}WO_3$  présente la meilleure absorption et conductivité dans le proche infrarouge.

- **Composition chimique :**
  - **Principaux éléments :** césium (Cs), tungstène (W), oxygène (O).

#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

- **Rapport molaire** :  $Cs_xW_{10}O_3$ ,  $x \leq 1$ , la teneur en oxygène est fixée à 3.
- **Poids moléculaire** : Prenons l'exemple de  $Cs_{0.32}WO_3$ , environ 287,3 g/mol.
- **Exigences de pureté** : qualité industrielle  $\geq 99,5$  %, qualité recherche  $\geq 99,9$  % (chapitre 7.4).
- **Propriétés physiques** :
  - **Aspect** : Nanopoudre bleu foncé ou verte , taille des particules ~20–50 nm (chapitre 3.5).
  - **Densité** : ~7,2 g/cm<sup>3</sup>.
  - **Solubilité** : Insoluble dans l'eau, résistant aux acides et aux alcalis (Chapitre 4.3).

césium détermine ses propriétés optiques et électriques uniques, ce qui le rend largement utilisé dans les films pour fenêtres intelligentes (chapitre 5.1), la photocatalyse (chapitre 6.2) et les batteries (chapitre 6.1). Comparé à d'autres bronzes au tungstène (tels que  $NaxWO_3$  et  $KxWO_3$ ), le  $Cs_xWO_3$  présente une meilleure performance de blindage NIR (~70 % contre ~50 % pour  $NaxWO_3$ ) en raison du rayon ionique plus grand des ions césium (~1,88 Å).

## 1.2 Découverte et développement du bronze au césium et au tungstène

Le bronze au tungstène et au césium est né de l'étude du bronze au tungstène au XIXe siècle. En 1823, le chimiste allemand Wöhler a synthétisé pour la première fois du bronze au tungstène et a observé des composés sombres formés par du  $WO_3$  dopé aux métaux alcalins. Dans les années 1950, le scientifique japonais Kihlberg a confirmé la structure cristalline hexagonale du  $Cs_xWO_3$  par diffraction des rayons X (DRX), posant ainsi les bases de cette structure (chapitre 4, 4.1). Dans les années 1970, le  $Cs_xWO_3$  a été utilisé dans la recherche sur les écrans en raison de ses propriétés électrochromes (variation de transmittance d'environ 60 %).

- **Étapes clés** :
  - **Années 1980** : Des chercheurs américains ont découvert les propriétés d'absorption NIR du  $Cs_xWO_3$  (~1000–2500 nm), ce qui a favorisé son exploration dans le domaine des revêtements optiques (chapitre 5.2).
  - **Années 1990** : Le Japon a développé la méthode solvothermale (chapitre 3.2), qui a permis la synthèse à grande échelle de nanoparticules de  $Cs_xWO_3$  (< 50 nm), réduisant le coût à ~ 1 000 USD/kg .
  - **Années 2000** : Des équipes de recherche chinoises ont optimisé les performances photocatalytiques du  $Cs_xWO_3$  (chapitre 6.2), avec une efficacité de production d'hydrogène d'environ 200  $\mu\text{mol} / (\text{g} \cdot \text{h})$  .
  - **Années 2010** : L'UE promeut l'application du  $Cs_xWO_3$  dans les films pour fenêtres intelligentes (chapitre 5.1), avec une efficacité d'économie d'énergie d'environ 50 % et une croissance du marché d'environ 50 millions de dollars américains .
  - **Années 2020** : Focus mondial sur la synthèse verte (chapitre 3.5), empreinte carbone réduite à ~0,5 tonne de  $CO_2$ /tonne (chapitre 9.4) .

### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

Ces dernières années, la recherche sur le bronze au césium tungstène est passée de la performance de base à l'industrialisation (chapitre 7) et à la durabilité (chapitre 9), en particulier dans la région Asie-Pacifique, où la Chine soutient l'application économe en énergie du CsxWO<sub>3</sub> grâce à sa politique de « double carbone » (chapitre 9 9.5).

### 1.3 Le statut du bronze au césium et au tungstène dans la science des matériaux

Le bronze au césium tungstène occupe une place importante dans la science des matériaux car il combine les propriétés des nanomatériaux, des semi-conducteurs et des matériaux optiques, comblant ainsi les lacunes des matériaux traditionnels dans les domaines de la régulation NIR et de la conversion d'énergie.

- **Valeur scientifique :**

- **Propriétés nanométriques :** Les nanoparticules de CsxWO<sub>3</sub> (~20 nm) ont une surface spécifique élevée (~80 m<sup>2</sup>/g, chapitre 4.2), ce qui améliore l'efficacité catalytique (chapitre 6.2).
- **Propriétés des semi-conducteurs :** bande interdite ~2,5–3,0 eV (chapitre 2.2), supportant la conversion photoélectrique (chapitre 5.3).
- **Effet plasmon :** la résonance plasmonique de surface localisée (LSPR) améliore l'absorption NIR (~70%), ce qui est meilleur que l'ITO traditionnel (~40%, chapitre 5.2).

- **Comparaison avec d'autres matériaux :**

- **Comparé à l'ITO :** le CsxWO<sub>3</sub> présente des avantages en termes de blindage NIR (~70 % contre ~40 %) et de coût (~500 USD/kg contre ~1000 USD/kg).
- **Comparé au VO<sub>2</sub> :** La stabilité thermique du CsxWO<sub>3</sub> (> 500 °C contre ~ 68 °C de transition de phase) est plus adaptée aux environnements à haute température (chapitre 5, 5.5).
- **Comparé au graphène :** le CsxWO<sub>3</sub> est plus spécifique dans l'absorption NIR, mais a une conductivité légèrement inférieure (~10<sup>3</sup> contre ~10<sup>6</sup> S/cm, chapitre 2, 2.3).

- **Impact interdisciplinaire :**

- Promouvoir le développement de la photonique (chapitre 5.4), du stockage d'énergie (chapitre 6.1) et des sciences de l'environnement (chapitre 6.3).
- Il fournit un paradigme de recherche pour les nanomatériaux fonctionnels (tels que les MXenes et le MoS<sub>2</sub>) (chapitre 10, 10.2).

Le bronze au césium tungstène l'a placé à l'avant-garde de la science des matériaux, en particulier dans les domaines de la conservation de l'énergie et de la protection de l'environnement (chapitre 9.1).

### 1.4 État de la recherche mondiale et aperçu du marché du bronze au césium tungstène

La recherche et le marché mondiaux du bronze au tungstène césium montrent une croissance rapide d'ici 2025, en particulier en Asie-Pacifique, en Europe et en Amérique du Nord.

- **Statut de la recherche :**

#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

- **Chine** : L'Université Tsinghua et d'autres institutions se concentrent sur la synthèse verte (chapitre 3, 3.5) et la photocatalyse (chapitre 6, 6.2), avec une moyenne d'environ 150 demandes de brevet par an.
- **Japon** : L'Université de Tokyo a optimisé le film mince CsxWO<sub>3</sub> (chapitre 5.1), avec un taux de blindage NIR d'environ 80 %.
- **UE** : L'Institut Fraunhofer allemand a développé des matériaux de batterie CsxWO<sub>3</sub> (chapitre 6.1) avec une durée de vie de cycle > 1000 fois.
- **USA** : Le MIT explore les effets quantiques du CsxWO<sub>3</sub> (chapitre 2.5), augmentant la conductivité d'environ 20 %.
- **Aperçu du marché** :
  - **Taille** : Le marché mondial devrait atteindre 120 millions de dollars américains en 2025 et augmenter à 250 millions de dollars américains en 2030 (croissance annuelle moyenne d'environ 15 %).
  - **Principales régions** : Asie-Pacifique ~50% (Chine ~30%), Europe ~30%, Amérique du Nord ~15%.
  - **Prix** : CsxWO<sub>3</sub> de qualité nano ~ 500 USD/kg, qualité film mince ~ 1000 USD/kg (chapitre 7.2).
  - **Facteurs moteurs** : demande d'économie d'énergie (film pour fenêtre intelligent, chapitre 5, 5.1), nouvelles énergies (batteries, chapitre 6, 6.1) et politiques de protection de l'environnement (chapitre 9, 9.5).
- **défi** :
  - Coût de synthèse élevé (~500 USD/kg contre ITO ~100 USD/kg).
  - La toxicité des nanoparticules doit être évaluée (chapitre 8, 8.3).
  - La cohérence de la production à grande échelle est faible (chapitre 7.3, erreur ~10%).

La recherche mondiale s'oriente vers la synthèse à faible coût (chapitre 3.5) et l'application intelligente (chapitre 10.3) pour répondre à la demande du marché.

### 1.5 Principaux domaines d'application du bronze au césium et au tungstène

Le bronze au césium tungstène est largement utilisé dans les domaines suivants en raison de sa polyvalence, voir les chapitres 5 à 6 pour plus de détails.

- **Optique et génie thermique (Chapitre 5)** :
  - **Film pour fenêtre intelligent** : le revêtement CsxWO<sub>3</sub> réduit la consommation d'énergie du bâtiment d'environ 50 % (chapitre 5.1).
  - **Conversion photothermique** : Efficacité d'absorption de l'énergie solaire ~60% (Chapitre 5.3).
  - **Blindage NIR** : Revêtement de verre automobile, taux de blindage ~70 % (chapitre 5.2).
- **Énergie (Chapitre 6)** :
  - **Batterie** : électrode CsxWO<sub>3</sub>, densité énergétique ~200 Wh /kg (Chapitre 6, 6.1).

#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

- **Photocatalyse** : efficacité de production d'hydrogène  $\sim 200 \mu\text{mol} / (\text{g} \cdot \text{h})$  (Chapitre 6, 6.2).
- **Stockage d'hydrogène** : Capacité de stockage d'hydrogène  $\sim 1,5 \%$  en poids (chapitre 6, 6.5).
- **Environnement (Chapitre 6) :**
  - **Purification de l'air** : adsorption des COV, efficacité  $\sim 90\%$  (Chapitre 6, 6.3).
  - **Traitement de l'eau** : Dégradation photocatalytique des colorants, efficacité  $\sim 85\%$  (Chapitre 6, 6.2).
- **Electronique (Chapitre 5) :**
  - **Capteur** : film mince  $\text{CsxWO}_3$ , sensibilité  $\sim 10 \text{ ppm}$  ( $\text{NO}_2$ , chapitre 5.4).
  - **Affichage** : Electrochromique, temps de réponse  $< 1 \text{ s}$  (Chapitre 5.4).
- **Cas** : En 2024, CTIA GROUP LTD a développé le film pour fenêtre intelligent  $\text{CsxWO}_3$ , qui a été appliqué à un bâtiment écologique à Shanghai, permettant d'économiser de l'énergie d'environ  $40 \%$  et d'une valeur marchande d'environ 10 millions de dollars américains (chapitre 7.5).

Ces domaines d'application démontrent la valeur stratégique du bronze au césium tungstène dans la conservation de l'énergie, la protection de l'environnement et les nouvelles énergies, et seront encore développés dans la fabrication intelligente et verte à l'avenir (chapitre 10, 10.1–10.5).

## Cesium Tungsten Bronze Product Introduction

CTIA GROUP LTD

### 1. Cesium Tungsten Bronze Overview

Cesium Tungsten Bronze ( $Cs_xWO_3$ ,  $0 < x \leq 1$ ) produced by CTIA GROUP is manufactured using advanced solvothermal and chemical vapor deposition processes, ensuring high purity and excellent optoelectronic performance. Cesium tungsten bronze is a nano-functional material widely applied in energy-saving glass, optoelectronics, catalysis, batteries, and biomedical fields due to its outstanding near-infrared (NIR) shielding performance, high visible light transmittance, and electrochemical stability. Its unique tungsten-oxygen-cesium crystal structure makes it the preferred material for smart materials and new energy applications.

### 2. Cesium Tungsten Bronze Features

Chemical composition:  $Cs_xWO_3$  ( $x = 0.2-0.33$ ), purity  $\geq 99.9\%$ , extremely low impurities.

Appearance: Deep blue nanopowder or thin film; cubic or hexagonal crystal structure.

Near-infrared shielding: NIR shielding rate  $> 90\%$  (800–2500 nm), suitable for energy-saving glass.

Visible light transmittance: Transmittance  $> 70\%$  (400–700 nm), supporting smart window applications.

Electrical conductivity:  $\sim 10^3$  S/cm, ideal for optoelectronic sensors and battery electrodes.

Chemical stability: Corrosion rate  $< 0.002$  mm/year, acid and alkali resistant, suitable for catalytic environments.

Versatility: Supports electrochromic, photothermal conversion, and biocompatible coatings.

### 3. Cesium Tungsten Bronze Product Specifications

Type	Particle Size (nm)	Purity (wt%)	Bulk Density (g/cm <sup>3</sup> )	Cesium Content (wt%)	Impurities (wt%, Max)
Nano-grade	30–50	$\geq 99.9$	2.5–3.0	5.0–8.0	Fe $\leq 0.002$ , Si $\leq 0.001$ , O $\leq 0.05$

### 4. Cesium Tungsten Bronze 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 anti-oxidation storage.

Quality assurance: Each batch is accompanied by a quality certificate containing the following test data:

- Purity (ICP-MS,  $> 99.9\%$ )
- Particle size distribution (laser diffraction)
- Crystal structure (XRD)
- Cesium content (chemical titration)
- Surface morphology (SEM)

### 5. Cesium Tungsten Bronze Procurement Information

Email: [sales@chinatungsten.com](mailto:sales@chinatungsten.com)

Phone: +86 592 5129595

Website: For more information about cesium tungsten bronze, please visit China Tungsten Online (<http://www.cesium-tungsten-bronze.com/>).

#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

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

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



## Chapitre 2 : Structure cristalline et propriétés du bronze au césium et au tungstène

Le bronze au césium tungstène ( $Cs_xWO_3$ ,  $0 < x \leq 1$ ) est un nanomatériau fonctionnel dont la structure cristalline unique et les excellentes propriétés physiques et chimiques le rendent largement utilisé dans les domaines de l'optique, de l'électronique, de l'énergie et de la gestion thermique. Les performances du  $Cs_xWO_3$  proviennent de sa structure cristalline hexagonale ou cubique, de sa capacité d'absorption dans le proche infrarouge (NIR) ( $\sim 70\%$  à  $1\ 000\text{ nm}$ ), de sa conductivité élevée ( $\sim 10^3\text{ S/cm}$ ) et de sa stabilité thermique ( $> 500\text{ }^\circ\text{C}$ ). Ce chapitre aborde la structure cristalline et les caractéristiques des liaisons chimiques, les propriétés optiques (absorption et transmittance dans le NIR), les propriétés électriques (conductivité et migration des porteurs), les propriétés thermiques (conductivité et stabilité thermiques), ainsi que les calculs théoriques et les prévisions de performances du bronze au césium tungstène, fournissant une base pour les recherches ultérieures sur les applications et la préparation.

### 2.1 Structure cristalline et caractéristiques de liaison chimique du bronze au césium et au tungstène

Le bronze césium-tungstène est au cœur de ses performances fonctionnelles. Le  $Cs_xWO_3$  est composé d'octaèdres  $WO_6$ , et des ions césium ( $Cs^+$ ) sont insérés dans les espaces octaédriques pour former un système cristallin hexagonal ( $x \sim 0,32$ ) ou cubique ( $x \sim 1$ ). La structure hexagonale (groupe d'espace  $P6_3/mcm$ ) présente un tunnel unidimensionnel, propice à la migration des ions césium, tandis que la structure cubique ( $Pm3m$ ) est plus compacte, ce qui affecte les propriétés électriques.

- **Caractéristiques structurelles :**
  - **Octaèdre  $WO_6$  :** Le tungstène ( $W^{6+}$ ) forme un octaèdre avec six oxygènes ( $O^{2-}$ ), et la longueur de liaison  $WO$  est d'environ  $1,9\text{ \AA}$ .

#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

- **Dopage au césium** :  $\text{Cs}^+$  (rayon  $\sim 1,88 \text{ \AA}$ ) occupe des tunnels hexagonaux ou des interstitiels cubiques, la valeur  $x$  déterminant la structure et les propriétés.
- **Paramètres du réseau** :  $\text{Cs}_{0.32}\text{WO}_3$  hexagonal,  $a \sim 7.4 \text{ \AA}$ ,  $c \sim 7.6 \text{ \AA}$  ;  $\text{CsWO}_3$  cubique,  $a \sim 3.8 \text{ \AA}$ .
- **Effet de la taille des particules** : Les nanoparticules ( $\sim 20 \text{ nm}$ ) sont légèrement déformées en raison des effets de surface, avec une déformation du réseau d'environ 0,5 %.
- **Caractéristiques des liaisons chimiques** :
  - **Liaison WO** : Liaison mixte covalente-ionique, conférant une stabilité chimique élevée (taux de corrosion  $< 0,001 \text{ mm/an}$ ).
  - **Liaison Cs-O** : Liaison ionique faible,  $\text{Cs}^+$  peut migrer partiellement, affectant la conductivité ( $\sim 10^3 \text{ S/cm}$ ).
  - **Électrons localisés** : les états de valence mixtes  $\text{W}^{5+} / \text{W}^{6+}$  génèrent des électrons libres et améliorent l'absorption NIR.

L'analyse par diffraction des rayons X (DRX) montre que la structure hexagonale du  $\text{Cs}_{0.32}\text{WO}_3$  est supérieure à la structure cubique en termes de blindage et de conductivité dans le proche infrarouge, car son effet tunnel favorise le comportement dynamique des électrons et des ions. L'ajustement du rapport de dopage ( $x$ ) permet d'optimiser les performances. Par exemple, lorsque  $x = 0,32$ , le taux d'absorption dans le proche infrarouge atteint environ 70 %, tandis que lorsque  $x = 0,5$ , la conductivité est améliorée d'environ 15 %.

## 2.2 Propriétés optiques du bronze au césium tungstène : absorption et transmittance dans le proche infrarouge

Le bronze au césium tungstène est connu pour son absorption NIR et sa transmission de la lumière visible, ce qui lui confère des avantages uniques dans les films pour fenêtres intelligents et la conversion de la lumière en chaleur.

- **Absorption proche infrarouge** :
  - **Mécanisme** : La résonance plasmonique de surface localisée (LSPR) et les transitions électroniques entre  $\text{W}^{5+} / \text{W}^{6+}$  conduisent à une forte absorption NIR (800–2500 nm).
  - **Performances** : Les nanoparticules de  $\text{Cs}_{0.32}\text{WO}_3$  ( $\sim 20 \text{ nm}$ ) ont un taux d'absorption d'environ 70 % à 1 000 nm, ce qui est meilleur que l'ITO ( $\sim 40 \%$ ).
  - **Facteurs d'influence** : Lorsque la valeur  $x$  augmente ( $0,1 \rightarrow 0,32$ ), le pic d'absorption se décale vers le rouge d'environ 200 nm ; lorsque la taille des particules diminue ( $50 \rightarrow 20 \text{ nm}$ ), l'absorption augmente d'environ 10 %.
- **Transmission de la lumière visible** :
  - **Transmission** : Dans la plage de 400 à 700 nm, la transmission du film  $\text{Cs}_x\text{WO}_3$  (épaisseur  $\sim 100 \text{ nm}$ ) est d'environ 80 %, ce qui convient au verre à économie d'énergie.
  - **Électrochrome** : Avec une tension appliquée ( $\sim 2 \text{ V}$ ), la transmittance peut être

### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

ajustée à ~60 % pour une gradation dynamique.

- **Stabilité** : Après vieillissement UV (1000 h), la décroissance de la transmittance est < 5 %.
- **Potentiel d'application** :
  - Film pour fenêtre intelligent : taux de blindage NIR ~ 70 %, réduisant la consommation d'énergie du bâtiment ~ 50 %.
  - Conversion photothermique : Efficacité d'absorption de l'énergie solaire ~60% pour la gestion thermique.

Les tests de spectroscopie ultraviolet-visible-proche infrarouge (UV-Vis-NIR) montrent que la bande interdite du Cs<sub>x</sub>WO<sub>3</sub> est d'environ 2,5 à 3,0 eV, inférieure à celle du WO<sub>3</sub> (environ 3,2 eV), ce qui améliore la réponse dans le proche infrarouge. Comparé au VO<sub>2</sub> (température de transition de phase d'environ 68 °C), le Cs<sub>x</sub>WO<sub>3</sub> est plus stable à haute température et convient à une large gamme de conditions climatiques.

### 2.3 Propriétés électriques du bronze césium tungstène : conductivité et migration des porteurs

Le bronze au césium tungstène provient de ses propriétés semi-conductrices et de ses électrons libres, ce qui le rend adapté aux capteurs et aux électrodes de batterie.

- **Conductivité** :
  - **Valeur** : La conductivité du film mince de Cs<sub>0.32</sub>WO<sub>3</sub> (épaisseur ~100 nm) est d'environ 10<sup>3</sup> S/cm, ce qui est inférieur à celui du graphène (~10<sup>6</sup> S/cm) mais supérieur à celui du WO<sub>3</sub> (~10 S/cm).
  - **Mécanisme** : L'état de valence mixte W<sup>5+</sup>/W<sup>6+</sup> et le dopage Cs<sup>+</sup> introduisent des électrons libres avec une concentration de porteurs d'environ 10<sup>20</sup> cm<sup>-3</sup>.
  - **Facteurs d'influence** : Lorsque la valeur x augmente (0,1→0,5), la conductivité augmente d'environ 20 % ; lorsque la température monte à 300 °C, la conductivité diminue d'environ 10 %.
- **Migration de l'opérateur** :
  - **Mobilité** : Mobilité électronique ~10 cm<sup>2</sup>/(V·s), affectée par la diffusion aux joints de grains.
  - **Type** : semi-conducteur de type n, les électrons sont les porteurs dominants.
  - **Test** : Les mesures de l'effet Hall montrent que la durée de vie du porteur de Cs<sub>0.32</sub>WO<sub>3</sub> est d'environ 1 ps.
- **Potentiel d'application** :
  - **Capteur** : Le film mince Cs<sub>x</sub>WO<sub>3</sub> détecte le NO<sub>2</sub> (~10 ppm) avec un temps de réponse <5 s.
  - **Électrode de batterie** : batterie Li-ion, la conductivité prend en charge une durée de vie d'environ 1 000 fois.

Des mesures à quatre sondes montrent que la conductivité des nanoparticules (~20 nm) est inférieure à celle des couches minces (~100 nm) en raison d'une augmentation d'environ 30 % de la résistance aux joints de grains. L'optimisation du dopage (x~0,32) et du recuit (~400 °C) peut améliorer les

#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

performances.

## 2.4 Propriétés thermiques du bronze au césium tungstène : conductivité thermique et stabilité

Le bronze au césium tungstène présente une faible conductivité thermique et une stabilité thermique élevée, ce qui convient à la gestion thermique et aux applications à haute température.

- **Conductivité thermique :**
  - **Valeur :** La conductivité thermique de Cs<sub>0.32</sub>WO<sub>3</sub> (~20 nm) est d'environ 1,5 W/( m·K ), ce qui est inférieur à celui de WO<sub>3</sub> (~3 W/( m·K )).
  - **Mécanisme :** La diffusion des phonons et l'effet nanométrique réduisent la conductivité thermique.
  - **Facteurs d'influence :** Lorsque la valeur x augmente (0,1→0,5), la conductivité thermique augmente d'environ 10 % ; lorsque la taille des particules augmente (20→50 nm), la conductivité thermique augmente d'environ 15 %.
- **Stabilité thermique :**
  - **Plage de température :** Cs<sub>x</sub>WO<sub>3</sub> est stable à < 500 °C, la perte d'oxygène est d'environ 5 % à > 600 °C.
  - **Résistance à l'oxydation :** 500°C à l'air, taux d'oxydation <0,01 mg/cm<sup>2</sup>·h.
  - **Dilatation thermique :** Le coefficient de dilatation thermique est d'environ 8×10<sup>-6</sup> K<sup>-1</sup>, ce qui est inférieur à celui de l'ITO (environ 10×10<sup>-6</sup> K<sup>-1</sup>).
- **Potentiel d'application :**
  - **Gestion thermique :** Faible conductivité thermique pour les revêtements barrières thermiques, réduisant les températures d'environ 10°C.
  - **Électrodes haute température :** Les électrodes de batterie sont stables à 400°C avec une dégradation des performances du cycle <5%.

La calorimétrie différentielle à balayage (DSC) a montré que la température de décomposition thermique du Cs<sub>x</sub>WO<sub>3</sub> était d'environ 650 °C, ce qui est supérieur à celle du VO<sub>2</sub> (transition de phase d'environ 68 °C). L'analyse thermogravimétrique (ATG) a confirmé sa stabilité à haute température et son adéquation aux environnements difficiles.

## 2.5 Calcul théorique et prévision des performances du bronze au césium tungstène

Les calculs théoriques fournissent des indications pour l'optimisation des performances de Cs<sub>x</sub>WO<sub>3</sub>, en utilisant la théorie fonctionnelle de la densité (DFT) et les méthodes de dynamique moléculaire (MD).

- **Calculs DFT :**
  - **Bande interdite :** la bande interdite Cs<sub>0.32</sub>WO<sub>3</sub> ~2,5 eV, l'état W<sup>5+</sup>/W<sup>6+</sup> améliore l'absorption NIR.
  - **Structure électronique :** Le dopage au Cs<sup>+</sup> abaisse le niveau de Fermi d'environ 0,5 eV et augmente la concentration de porteurs d'environ 10<sup>20</sup>cm<sup>-3</sup>.
  - **Propriétés optiques :** Le pic d'absorption NIR simulé est d'environ 1 000 nm, ce

### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

qui est cohérent avec l'expérience (erreur < 5 %).

- **Simulation MD :**
  - **Conductivité thermique :** prédite  $\sim 1,5 \text{ W}/(\text{m}\cdot\text{K})$  en raison de la diffusion des phonons.
  - **Stabilité :**  $\text{Cs}^+$  a une mobilité d'environ  $10^{-8} \text{ cm}^2/\text{s}$  à  $500^\circ\text{C}$  et maintient son intégrité structurelle.
- **Prédiction des performances :**
  - **Optimisation du dopage :**  $x=0,4$  peut augmenter la conductivité d'environ 25 % et l'absorption NIR d'environ 10 %.
  - **Nano-conception :** taille des particules < 10 nm, absorption améliorée par LSPR  $\sim 15 \%$ .
  - **Matériau composite :** composite  $\text{Cs}_x\text{WO}_3/\text{TiO}_2$ , efficacité photocatalytique augmentée d'environ 30 %.

Étude de cas : CTIA GROUP LTD a optimisé une couche mince de  $\text{Cs}_{0.32}\text{WO}_3$  par DFT, avec un taux de blindage proche infrarouge d'environ 75 % et une réduction des coûts d'environ 20 % (environ 400 USD/kg). Les résultats des calculs ont guidé le développement de synthèses écologiques et d'applications intelligentes.

La précision du modèle théorique (erreur < 5 %) constitue la base de la régulation des performances de  $\text{Cs}_x\text{WO}_3$ . À l'avenir, l'IA et le big data seront combinés pour améliorer encore la précision des prédictions.

**COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT**



### Chapitre 3 : Méthode de synthèse du bronze au césium et au tungstène

Le bronze césium tungstène ( $Cs_xWO_3$ ,  $0 < x \leq 1$ ) est un nanomatériau haute performance dont l'absorption dans le proche infrarouge ( $\sim 70\%$  à  $1\ 000\text{ nm}$ ), la conductivité ( $\sim 10^3\text{ S/cm}$ ) et la stabilité chimique dépendent du contrôle précis de la méthode de synthèse. Cette méthode détermine la structure cristalline (hexagonale ou cubique), la taille des particules ( $\sim 10\text{--}50\text{ nm}$ ), le rapport de dopage ( $x \sim 0,1\text{--}1$ ) et les performances (telles que le taux de blindage NIR  $\sim 70\%$ ) du  $Cs_xWO_3$ . Ce chapitre détaille cinq principales méthodes de synthèse : la méthode de réaction en phase solide, la méthode solvothermale et la méthode hydrothermale, le dépôt chimique en phase vapeur (CVD), la méthode sol-gel, ainsi que la synthèse verte et le contrôle des nanoparticules. Il analyse leur mécanisme réactionnel, les paramètres du procédé, les exigences en matière d'équipement, le rendement, le coût, les avantages et les inconvénients, ainsi que les scénarios d'application, et fournit des références techniques pour la recherche et l'industrialisation.

#### 3.1 Méthode de réaction à l'état solide du bronze au césium et au tungstène

La méthode de réaction en phase solide est une méthode de synthèse à haute température qui permet de préparer du  $Cs_xWO_3$  par réaction directe de matières premières solides. Elle convient à la production de matériaux en vrac et de poudres. Ses avantages sont la simplicité de l'équipement et un rendement élevé, mais la grande taille des particules ( $\sim 1\text{--}10\ \mu\text{m}$ ) rend difficile la préparation de nanoparticules.

- **Mécanisme réactionnel :**
  - **Équation chimique :**  $Cs_2CO_3 + WO_3 \rightarrow Cs_xWO_3 + CO_2\uparrow$  ( $x \sim 0,1\text{--}0,32$ )
  - **Processus :**  $Cs_2CO_3$  se décompose pour libérer  $Cs^+$ , qui se combine avec l'octaèdre  $WO_6$  dans  $WO_3$ , et  $Cs^+$  s'insère dans le tunnel hexagonal pour former  $Cs_xWO_3$ . La température élevée ( $\sim 800\text{ °C}$ ) favorise la diffusion, et  $W^{6+}$  est partiellement réduit en  $W^{5+}$ , générant des électrons libres.
  - **Réaction secondaire :** une température excessivement élevée ( $> 1000\text{ °C}$ ) provoque la volatilisation du Cs et la valeur x diminue d'environ 10 %.
- **Paramètres du processus :**
  - **Matières premières :**  $Cs_2CO_3$  (pureté  $> 99,5\%$ ),  $WO_3$  ( $> 99,9\%$ ), rapport

#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

molaire 1:3–1:10.

- **Température** : 700–900°C, vitesse de rampe ~10°C/min.
- **Atmosphère** : Inerte ( Ar ) ou réductrice (H<sub>2</sub>/ Ar , 5% H<sub>2</sub>), évite l'oxydation.
- **Durée** : 4 à 8 h, vitesse de refroidissement ~5°C/min.
- **Équipement** : Four tubulaire (tenue en température > 1200°C), creuset en alumine.
- **Rendement et coût** :
  - **Rendement** : ~90 % (en masse), ~1 à 10 kg par lot.
  - **Coût** : ~200 USD/kg, ~60% de matières premières, ~30% d'énergie.
- **performance** :
  - **Taille des particules** : ~1–10 µm , surface spécifique ~5 m<sup>2</sup>/g.
  - **Pureté** : > 99,5 %, impuretés (Fe, Si) < 0,01 % en poids .
  - **Absorption NIR** : ~50% à 1000 nm, en dessous de l'échelle nanométrique (~70%).
  - **Conductivité électrique** : ~500 S/cm, affectée par les joints de grains.
- **Avantages et inconvénients** :
  - **Avantages** : Le procédé est mature, adapté à l'industrialisation et le coût de l'équipement est faible (~10 000 USD).
  - **Inconvénients** : grande taille des particules, faibles performances NIR, la volatilisation du Cs conduit à une valeur x inégale (erreur ~ 5 %).
  - **Amélioration** : L'ajout d'additifs (tels que Li<sub>2</sub>CO<sub>3</sub>) réduit la température de réaction d'environ 100 °C et le traitement par broyage à boulets réduit la taille des particules d'environ 50 %.
- **application** :
  - Électrode en vrac : électrode de batterie, durée de vie du cycle ~ 800 fois.
  - Poudre grossière : Revêtement de gestion thermique, refroidissement ~5°C.

La méthode de réaction en phase solide convient à une production à grande échelle et à faible coût, mais doit être optimisée pour répondre aux exigences à l'échelle nanométrique.

### 3.2 Méthodes solvothermales et hydrothermales du bronze au césium et au tungstène

Les méthodes solvothermales et hydrothermales synthétisent des nanoparticules de Cs<sub>x</sub>WO<sub>3</sub> (~10–50 nm) par des réactions en phase liquide à haute température et haute pression. Ces nanoparticules sont connues pour leur surface spécifique élevée (~80 m<sup>2</sup>/g) et leurs excellentes performances dans le proche infrarouge (~70 %). La méthode hydrothermale utilise l'eau comme solvant, tandis que la méthode solvothermale utilise des solvants organiques (comme l'éthanol).

- **Mécanisme réactionnel** :
  - **Équation chimique** : CsOH + WCl<sub>6</sub> + H<sub>2</sub>O/ROH → Cs<sub>x</sub>WO<sub>3</sub> + HCl↑ (x~0,2–0,5)
  - **Méthode hydrothermale** : CsOH fournit Cs<sup>+</sup>, WCl<sub>6</sub> s'hydrolyse pour former des unités WO<sub>6</sub> et Cs<sup>+</sup> est inséré dans la structure hexagonale à 180–220° C.
  - **Méthode solvothermale** : l'éthanol réduit la tension superficielle, contrôle la taille des particules < 20 nm et augmente le rapport W<sup>5+</sup> d'environ 15 %.
  - **Légende** : pH ~8–10, régule l'efficacité d'insertion de Cs<sup>+</sup> ~90 %.

#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

- **Paramètres du processus :**
  - **Matières premières :** CsOH (>99,5%), WCl<sub>6</sub> (>99,9%), solvant (eau déionisée ou éthanol, >99,8%).
  - **Température :** hydrothermale 180–220°C, solvothermale 150–200°C.
  - **Pression :** 1–5 MPa, réacteur fermé.
  - **Durée :** 12 à 24 h, vitesse d'agitation ~ 200 tr/min.
  - **Équipement :** Réacteur en acier inoxydable (volume ~1–100 L), résistance à la pression >10 MPa.
- **Rendement et coût :**
  - **Rendement :** ~85 % (hydrothermal), ~80 % (solvothermal), ~0,1–1 kg par lot.
  - **Coût :** hydrothermal ~400 USD/kg, solvant thermique ~500 USD/kg, solvant représente ~40 %.
- **performance :**
  - **Taille des particules :** hydrothermale ~20–50 nm, solvothermale ~10–20 nm.
  - **Pureté :** > 99,8 %, Cl-résiduel < 0,005 % en poids .
  - **Absorption NIR :** ~70 % à 1 000 nm, transmittance ~80 % (400–700 nm).
  - **Conductivité :** ~800 S/cm, meilleure que la méthode en phase solide.
- **Avantages et inconvénients :**
  - **Avantages :** Taille des particules à l'échelle nanométrique, hautes performances NIR, morphologie contrôlable (bâtonnets, sphères).
  - **Inconvénients :** Équipement complexe (~50 000 USD), coût de traitement des déchets élevé (~10%).
  - **Améliorations :** Ajout de tensioactifs (tels que le PVP) pour contrôler la distribution granulométrique (erreur < 5 %), recyclage des solvants pour réduire les coûts d'environ 20 %.
- **application :**
  - Film pour fenêtre intelligent : taux de blindage NIR ~ 70 %, économie d'énergie ~ 50 %.
  - Photocatalyse : efficacité de production d'hydrogène ~200 μmol / ( g·h ).

La méthode hydrothermale a un coût inférieur, tandis que la méthode solvothermale a une taille de particules plus petite, ce qui convient aux exigences de haute performance.

### 3.3 Dépôt chimique en phase vapeur (CVD) de bronze au césium et au tungstène

Le dépôt chimique en phase vapeur (CVD) permet de déposer des couches minces de Cs<sub>x</sub>WO<sub>3</sub> (épaisseur d'environ 10 à 100 nm) par réaction de précurseurs en phase vapeur, adaptées aux dispositifs électroniques et optiques. Ce procédé se caractérise par l'uniformité du film et une grande pureté (> 99,9 %).

- **Mécanisme réactionnel :**
  - **Équation chimique :**  $CsCl(g) + WOCl_4(g) + H_2O(g) \rightarrow Cs_xWO_3(s) + HCl\uparrow$   
(x~0,1–0,32)
  - **Procédé :** CsCl et WOCl<sub>4</sub> sont vaporisés à 400–600 °C, H<sub>2</sub>O fournit de l'oxygène,

#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

Cs<sup>+</sup> et WO<sub>6</sub> sont nucléés sur un substrat (tel que du verre) et le rapport W<sup>5+</sup> est d'environ 10 %.

- **Réaction secondaire** : une température excessivement élevée (> 700 °C) provoque une précipitation de WO<sub>3</sub> et la valeur x diminue d'environ 5 %.
- **Paramètres du processus** :
  - **Précurseurs** : CsCl (>99,9%), WOCl<sub>4</sub> (>99,8%), H<sub>2</sub>O (ultrapure).
  - **Température** : 400–600°C pour le substrat, ~800°C pour la chambre de réaction.
  - **Atmosphère** : Ar /H<sub>2</sub> (5% H<sub>2</sub>), débit ~100 sccm .
  - **Pression** : 0,1–10 Torr.
  - **Équipement** : réacteur CVD (paroi chaude ou paroi froide), pompe à vide (<0,01 Torr).
- **Rendement et coût** :
  - **Rendement** : ~95 % (efficacité de dépôt), ~0,01–0,1 kg par lot.
  - **Coût** : ~1000 USD/kg, ~50% pour l'équipement.
- **performance** :
  - **Épaisseur** : 10–100 nm, uniformité < 5 % d'erreur.
  - **Pureté** : > 99,9 %, impureté (Cl) < 0,001 % en poids .
  - **Absorption NIR** : ~75 % à 1 000 nm, transmittance ~85 % (400–700 nm).
  - **Conductivité** : ~1200 S/cm, meilleure que la poudre.
- **Avantages et inconvénients** :
  - **Avantages** : Film de haute qualité, adapté aux appareils de précision, excellentes performances NIR.
  - **Inconvénients** : coût élevé, faible rendement, limitation du substrat (nécessite une résistance à la température > 400°C).
  - **Amélioration** : Le CVD amélioré par plasma (PECVD) réduit la température d'environ 100 °C et augmente l'efficacité d'environ 15 %.
- **application** :
  - Antenne 6G : débit de transmission ~10 Gbps.
  - Dispositif électrochrome : temps de réponse <1 s.

Le CVD est adapté aux films à forte valeur ajoutée, mais les coûts doivent être réduits pour sa promotion.

### 3.4 Méthode sol-gel du bronze au césium tungstène

La méthode sol-gel prépare des nanoparticules ou des films de Cs<sub>x</sub>WO<sub>3</sub> par des réactions chimiques en phase liquide, ce qui présente les avantages d'une basse température et d'un contrôle de la morphologie et convient à la production en laboratoire et à petite et moyenne échelle.

- **Mécanisme réactionnel** :
  - **Équation chimique** :  $CsNO_3 + W(OC_2H_5)_6 + H_2O \rightarrow Cs_xWO_3 + C_2H_5OH \uparrow$  (x ~ 0,2–0,4)
  - **Procédé** : W(OC<sub>2</sub>H<sub>5</sub>)<sub>6</sub> est hydrolysé pour former un gel WO<sub>6</sub>, CsNO<sub>3</sub> fournit Cs<sup>+</sup> et calciné à 300–500 °C pour former des nanoparticules ou des films Cs<sub>x</sub>WO<sub>3</sub>.

#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

- **Clé** : Contrôler le taux d'hydrolyse (pH ~7–9) pour éviter la précipitation de WO<sub>3</sub>.
- **Paramètres du processus** :
  - **Matières premières** : CsNO<sub>3</sub> (>99,5%), W(OC<sub>2</sub>H<sub>5</sub>)<sub>6</sub> (>99,8%), solvant mixte éthanol/eau.
  - **Température** : 25–60°C pour l'hydrolyse, 300–500°C pour la calcination.
  - **Temps** : 2 à 4 h pour la gélification et 4 à 6 h pour la calcination.
  - **Équipement** : Bain-marie à température constante, four à cuisson, spin coater (film mince).
- **Rendement et coût** :
  - **Rendement** : ~90 %, ~0,1–0,5 kg par lot.
  - **Coût** : ~600 USD/kg, dont ~70% de matières premières.
- **Performance** :
  - **Taille des particules** : ~15–30 nm (poudre), épaisseur ~50–200 nm (film mince).
  - **Pureté** : > 99,7 %, résidu C < 0,01 % en poids .
  - **Absorption NIR** : ~65% à 1000 nm, transmittance ~80%.
  - **Conductivité** : ~700 S/cm.
- **Avantages et inconvénients** :
  - **Avantages** : procédé basse température, équipement simple (~5 000 USD), formes variées (poudre, film).
  - **Inconvénients** : résidu organique, pureté légèrement inférieure et consommation d'énergie de calcination élevée.
  - **Amélioration** : Calcination assistée par micro-ondes, temps réduit d'environ 50 %, pureté augmentée d'environ 0,2 %.
- **Application** :
  - Photocatalyseur : Dégrade les colorants avec une efficacité d'environ 85 %.
  - Revêtement à économie d'énergie : taux de blindage NIR ~ 65 %.

La méthode sol-gel est très flexible et adaptée à la recherche et au développement ainsi qu'à la production personnalisée.

### 3.5 Synthèse verte et contrôle des nanoparticules de bronze au césium et au tungstène

La synthèse verte prépare des nanoparticules de Cs<sub>x</sub>WO<sub>3</sub> (<20 nm) grâce à des matières premières respectueuses de l'environnement et à des procédés à faible consommation d'énergie, mettant l'accent sur la durabilité et le contrôle à l'échelle nanométrique pour atteindre l'objectif de neutralité carbone de 2030.

- **Mécanisme réactionnel** :
  - **Équation chimique** :  $Cs_2CO_3 + (NH_4)_{10}W_{12}O_{41} + H_2O \rightarrow Cs_xWO_3 + NH_3 \uparrow$   
(x ~ 0,2–0,32)
  - **Procédé** : (NH<sub>4</sub>)<sub>10</sub>W<sub>12</sub>O<sub>41</sub> est utilisé comme source de tungstène respectueuse de l'environnement, Cs<sub>2</sub>CO<sub>3</sub> fournit Cs<sup>+</sup> et une réaction hydrothermale ou assistée par micro-ondes à basse température (< 200 °C) est utilisée pour contrôler la taille des particules à ~ 10–20 nm.

#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

- **Clé** : Bio-modèle (par exemple cellulose) ou assisté par ultrasons, distribution granulométrique < 5 %.
- **Paramètres du processus** :
  - **Matières premières** : Cs<sub>2</sub>CO<sub>3</sub> (>99,5%), (NH<sub>4</sub>)<sub>10</sub>W<sub>12</sub>O<sub>41</sub> (>99,8%), eau déionisée.
  - **Température** : 100–200°C (hydrothermal), 80–120°C (micro-ondes).
  - **Durée** : 6 à 12 h (hydrothermal), 0,5 à 2 h (micro-ondes).
  - **Équipement** : réacteur micro-ondes (~1000 W), nettoyeur à ultrasons (~500 W).
- **Rendement et coût** :
  - **Rendement** : ~80 %, ~0,05–0,5 kg par lot.
  - **Coût** : ~450 USD/kg, ~20% d'énergie.
- **performance** :
  - **Taille des particules** : ~10–20 nm, surface spécifique ~100 m<sup>2</sup>/g.
  - **Pureté** : >99,8 %, NH<sub>4</sub><sup>+</sup> résiduel <0,005 % en poids .
  - **Absorption NIR** : ~72% à 1000 nm, transmittance ~82%.
  - **Conductivité** : ~900 S/cm.
- **Caractéristiques écologiques** :
  - **Empreinte carbone** : ~0,3 tonne CO<sub>2</sub>/tonne, inférieure à l'hydrothermie traditionnelle (~0,5 tonne).
  - **Liquide usé** : taux de récupération de NH<sub>3</sub> > 95 %, recyclage de l'eau ~ 80 %.
  - **Consommation d'énergie** : La méthode micro-ondes est environ 50 % inférieure à la méthode hydrothermale (environ 100 kWh/kg).
- **Avantages et inconvénients** :
  - **Avantages** : protection de l'environnement, faible consommation d'énergie, petite granulométrie et excellentes performances.
  - **Inconvénients** : Rendement légèrement inférieur, investissement en équipement élevé (~20 000 USD).
  - **Amélioration** : l'IA optimise les paramètres de réaction, augmentant le rendement d'environ 10 % et réduisant les coûts d'environ 15 %.
- **Cas** : En 2024, CTIA GROUP LTD a utilisé la synthèse verte assistée par micro-ondes pour préparer du Cs<sub>0.32</sub>WO<sub>3</sub> (~15 nm), avec un taux de blindage NIR d'environ 72 % et une empreinte carbone d'environ 0,3 tonne de CO<sub>2</sub>/tonne, qui a été utilisé dans les films pour fenêtres de bâtiments écologiques.
- **application** :
  - Purification de l'air : adsorption des COV, efficacité ~90%.
  - Stockage d'hydrogène : capacité ~1,5 % en poids .

La synthèse verte représente la tendance future et, combinée à la technologie de nano-contrôle, favorisera l'industrialisation durable du Cs<sub>x</sub>WO<sub>3</sub>.

#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

## Cesium Tungsten Bronze Product Introduction

CTIA GROUP LTD

### 1. Cesium Tungsten Bronze Overview

Cesium Tungsten Bronze ( $Cs_xWO_3$ ,  $0 < x \leq 1$ ) produced by CTIA GROUP is manufactured using advanced solvothermal and chemical vapor deposition processes, ensuring high purity and excellent optoelectronic performance. Cesium tungsten bronze is a nano-functional material widely applied in energy-saving glass, optoelectronics, catalysis, batteries, and biomedical fields due to its outstanding near-infrared (NIR) shielding performance, high visible light transmittance, and electrochemical stability. Its unique tungsten-oxygen-cesium crystal structure makes it the preferred material for smart materials and new energy applications.

### 2. Cesium Tungsten Bronze Features

Chemical composition:  $Cs_xWO_3$  ( $x = 0.2-0.33$ ), purity  $\geq 99.9\%$ , extremely low impurities.

Appearance: Deep blue nanopowder or thin film; cubic or hexagonal crystal structure.

Near-infrared shielding: NIR shielding rate  $> 90\%$  (800–2500 nm), suitable for energy-saving glass.

Visible light transmittance: Transmittance  $> 70\%$  (400–700 nm), supporting smart window applications.

Electrical conductivity:  $\sim 10^3$  S/cm, ideal for optoelectronic sensors and battery electrodes.

Chemical stability: Corrosion rate  $< 0.002$  mm/year, acid and alkali resistant, suitable for catalytic environments.

Versatility: Supports electrochromic, photothermal conversion, and biocompatible coatings.

### 3. Cesium Tungsten Bronze Product Specifications

Type	Particle Size (nm)	Purity (wt%)	Bulk Density (g/cm <sup>3</sup> )	Cesium Content (wt%)	Impurities (wt%, Max)
Nano-grade	30–50	$\geq 99.9$	2.5–3.0	5.0–8.0	Fe $\leq 0.002$ , Si $\leq 0.001$ , O $\leq 0.05$

### 4. Cesium Tungsten Bronze 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 anti-oxidation storage.

Quality assurance: Each batch is accompanied by a quality certificate containing the following test data:

- Purity (ICP-MS,  $> 99.9\%$ )
- Particle size distribution (laser diffraction)
- Crystal structure (XRD)
- Cesium content (chemical titration)
- Surface morphology (SEM)

### 5. Cesium Tungsten Bronze Procurement Information

Email: [sales@chinatungsten.com](mailto:sales@chinatungsten.com)

Phone: +86 592 5129595

Website: For more information about cesium tungsten bronze, please visit China Tungsten Online (<http://www.cesium-tungsten-bronze.com/>).

#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

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

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



## Chapitre 4 : Technologie de caractérisation du bronze au césium et au tungstène

Le bronze au césium tungstène ( $Cs_xWO_3$ ,  $0 < x \leq 1$ ) est un nanomatériau multifonctionnel dont les propriétés (par exemple, absorption proche infrarouge  $\sim 70\%$  à  $1\ 000\text{ nm}$ , conductivité  $\sim 10^3\text{ S/cm}$ , stabilité thermique  $>500\text{ }^\circ\text{C}$ ) reposent sur une caractérisation précise de la structure cristalline, de la morphologie, de l'état chimique et des propriétés physiques. Ce chapitre détaille cinq techniques clés de caractérisation : la diffraction des rayons X (DRX) et l'analyse cristalline, la microscopie électronique à balayage (MEB) et la microscopie électronique à transmission (MET), la spectroscopie de photoélectrons X (XPS) et l'état chimique, la spectroscopie UV-Vis-NIR, et les méthodes d'essais électriques et thermiques. Chaque technique couvre les principes, les instruments, la préparation des échantillons, l'analyse des données, les résultats quantitatifs, les applications et les limites, fournissant un support technique pour l'étude des relations structure-propriété et le contrôle qualité du  $Cs_xWO_3$ .

### 4.1 Diffraction des rayons X (DRX) et analyse cristalline du bronze au césium et au tungstène

La diffraction des rayons X (DRX) est la principale technique permettant de caractériser la structure cristalline et la pureté de phase du  $Cs_xWO_3$ . Les paramètres de maille et les effets de dopage sont analysés grâce au diagramme d'interférence de la diffusion des rayons X avec les atomes du cristal.

- **principe :**
  - La DRX est basée sur la loi de Bragg ( $2d\sin\theta = n\lambda$ ), où  $d$  est l'espacement interplanaire,  $\theta$  est l'angle d'incidence et  $\lambda$  est la longueur d'onde des rayons X ( $Cu\ K\alpha$ ,  $\sim 1,5406\text{ \AA}$ ).

#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

- La structure hexagonale (P63/mcm,  $x \sim 0,32$ ) ou cubique (Pm3m,  $x \sim 1$ ) de  $CsxWO_3$  produit des pics de diffraction caractéristiques, tels que le pic (002)  $\sim 23,5^\circ$  (hexagonal).
- **Instruments et paramètres :**
  - **Instrument :** Diffractomètre à rayons X (type Bruker D8 Advance) équipé d'une source Cu K $\alpha$  (40 kV, 40 mA).
  - **Plage de balayage :**  $2\theta = 10\text{--}80^\circ$ , pas  $\sim 0,02^\circ$ , vitesse de balayage  $\sim 0,5^\circ/\text{min}$ .
  - **Préparation de l'échantillon :** La poudre de  $CsxWO_3$  ( $\sim 10$  mg) est aplatie sur une plaquette de silicium à fond nul, ou un film mince est placé directement sur un substrat (tel que du verre).
  - **Environnement :** Température ambiante, air ou atmosphère inerte (éviter l'oxydation).
- **Analyse des données :**
  - **Structure cristalline :** structure hexagonale de  $Cs_{0.32}WO_3$ ,  $a \sim 7,4 \text{ \AA}$ ,  $c \sim 7,6 \text{ \AA}$  ; les pics (002) et (200) confirment la phase hexagonale.
  - **Effet dopant :** Lorsque  $x$  augmente ( $0,1 \rightarrow 0,5$ ), le pic (002) se décale d'environ  $0,1^\circ$  et le réseau se dilate d'environ  $0,2 \%$  en raison de  $Cs^+$  ( $1,88 \text{ \AA}$ ).
  - **Taille des grains :** formule de Scherrer ( $D = K\lambda / \beta \cos\theta$ ), nanoparticules  $CsxWO_3$   $\sim 20$  nm,  $\beta \sim 0,4^\circ$ .
  - **Pureté de phase :** pic de phase d'impureté (comme  $WO_3$ )  $< 5 \%$  d'intensité, pureté  $> 99,5 \%$ .
- **Résultats quantitatifs :**
  - **Déformation du réseau :**  $\sim 0,5 \%$  (nanoparticules), due aux effets de surface.
  - **Rapport de phase :** phase hexagonale  $\sim 95\%$  ( $x=0,32$ ), phase cubique  $\sim 5\%$  (synthèse à haute température).
  - **Densité de défauts :**  $\sim 10^{15} \text{ cm}^{-2}$ , affectant la conductivité d'environ  $10 \%$ .
- **application :**
  - Confirmation structurelle : Vérification de la consistance hexagonale des films par méthode hydrothermale ( $\sim 20$  nm) et CVD ( $\sim 100$  nm).
  - Contrôle qualité : Détecte la volatilisation du Cs (erreur  $x < 5 \%$ ), assure des performances NIR d'environ  $70 \%$ .
- **limitation :**
  - Résolution limitée : les petits grains ( $< 10$  nm) ont des pics élargis, erreur d'environ  $10 \%$ .
  - L'état amorphe est difficile à détecter : la microscopie électronique en transmission (MET) est nécessaire.
  - Coût : Instrument  $\sim 200\,000$  USD, maintenance  $\sim 10\,000$  USD/an.

La DRX fournit des données de haute précision sur la structure cristalline du  $CsxWO_3$ , qui constitue la base de l'optimisation de la synthèse.

#### 4.2 Microscopie électronique à balayage (MEB) et microscopie électronique à transmission (MET) du bronze au césium et au tungstène

##### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

La microscopie électronique à balayage (MEB) et la microscopie électronique à transmission (MET) ont été utilisées pour caractériser la morphologie, la granulométrie et la microstructure du CsxWO3. La MEB a analysé la surface, tandis que la MET a révélé les détails internes au niveau atomique.

- **principe :**

- **MEB :** Un faisceau d'électrons (~5–20 kV) balaye l'échantillon et des images sont prises à l'aide d'électrons secondaires ou rétrodiffusés avec une résolution d'environ 1 nm.
- **TEM :** Des électrons de haute énergie (~200 kV) sont transmis à travers l'échantillon et une imagerie par diffraction ou contraste de phase est réalisée avec une résolution d'environ 0,1 nm.
- Les nanoparticules de CsxWO3 (~10–50 nm) ou les films minces (~100 nm) présentent des caractéristiques en forme de tige, sphériques ou à facettes.

- **Instruments et paramètres :**

- **Instrument SEM :** tel que FEI Quanta 650, canon à émission de champ, équipé d'EDS (spectromètre dispersif en énergie).
- **Instrument TEM :** tel que JEOL JEM-2100F, tension d'accélération 200 kV, équipé de SAED (diffraction électronique à zone sélectionnée).
- **Préparation des échantillons :**
  - MEB : poudre dispersée sur un ruban conducteur, ou film mince directement déposé sur le substrat.
  - TEM : La poudre est dispersée par ultrasons dans de l'éthanol et déposée sur une grille de cuivre en film de carbone ; le film doit être coupé par FIB (faisceau d'ions focalisés).
- **Environnement :** Vide poussé (<10<sup>-5</sup> Torr), le TEM nécessite un refroidissement à l'azote liquide.

- **Analyse des données :**

- **SEM :**
  - **Morphologie :** Particules hydrothermales CsxWO3 ~ 20 nm, en forme de tige (rapport d'aspect ~ 2:1) ; le film CVD est uniforme, rugosité ~ 5 nm.
  - **EDS :** rapport atomique Cs:W:O ~0,32:1:3, erreur <2%, confirmant le rapport de dopage.
  - **Distribution granulométrique :** ~10–50 nm, écart type ~5 nm.
- **TEM :**
  - **Haute résolution (HRTEM) :** (002) espacement des plans cristallins ~0,38 nm, phase hexagonale.
  - **SAED :** Réseau hexagonal, (002), (200) anneaux de diffraction, cohérence d'orientation cristalline > 95 %.
  - **Défauts :** Densité de dislocations ~10<sup>10</sup> cm<sup>-2</sup>, affectant la conductivité ~5%.

- **Résultats quantitatifs :**

- **Surface :** SEM estimée ~80 m<sup>2</sup>/g (particules ~20 nm), cohérente avec BET.

**COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT**

- **Joint de grain** : TEM montre que la largeur du joint de grain est d'environ 1 nm, ce qui affecte la migration des porteurs d'environ 10 %.
- **Distribution des éléments** : cartographie EDS, Cs est uniformément réparti, écart < 3 %.
- **application** :
  - Optimisation de la morphologie : contrôle des particules solvothermales (~10 nm) guidées par MEB.
  - Vérification structurelle : TEM a confirmé la phase hexagonale du film CVD, performance NIR ~75%.
  - Contrôle qualité : détection EDS des impuretés (Fe, Cl) < 0,01 % en poids .
- **limitation** :
  - MEB : Principalement des informations de surface, la structure interne nécessite un MET.
  - TEM : préparation d'échantillons complexes (FIB ~ 500 USD/échantillon), dommages par faisceau d'électrons CsxWO3 ~ 5 %.
  - Coût : SEM ~ 300 000 USD, TEM ~ 1 000 000 USD.

La combinaison du MEB et du MET offre une perspective complète pour la caractérisation à l'échelle nanométrique du CsxWO3.

#### 4.3 Spectroscopie photoélectronique à rayons X (XPS) et état chimique du bronze au césium et au tungstène

La spectroscopie photoélectronique à rayons X (XPS) est utilisée pour analyser l'état chimique de surface, la composition élémentaire et l'état de valence de CsxWO3, révélant l'effet de W<sup>5+</sup> /W<sup>6+</sup> sur les performances.

- **principe** :
  - XPS utilise des rayons X (Al K $\alpha$ , ~1486,6 eV) pour exciter les électrons à la surface de l'échantillon (<10 nm) et mesurer l'énergie de liaison (BE).
  - Les pics de photoélectrons Cs 3d, W 4f et O 1s de CsxWO3 reflètent l'état chimique et le dopage.
- **Instruments et paramètres** :
  - **Instrument** : tel que Thermo Fisher ESCALAB 250Xi, source Al K $\alpha$  monochromatique.
  - **Plage d'énergie** : 0–1200 eV, résolution ~0,5 eV.
  - **Préparation des échantillons** : Des pastilles ou des films de poudre sont placés sur un substrat conducteur et la surface est nettoyée par pulvérisation cathodique Ar<sup>+</sup> (~2 kV).
  - **Environnement** : Ultra-vide (<10<sup>-9</sup> Torr), évite la contamination au carbone.
- **Analyse des données** :
  - **État chimique** :
    - **Cs 3d** : Cs<sup>+</sup>, BE~724,5 eV (3d5/2), aucun autre état de valence.
    - **W 4f** : W<sup>6+</sup> (~35,5 eV, 4f7/2), W<sup>5+</sup> (~34,5 eV), rapport W<sup>5+</sup> ~10–20 %,

#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT



- **Plage de longueurs d'onde** : 200–2500 nm, résolution ~1 nm.
- **Préparation des échantillons** :
  - Poudre : dispersée dans une matrice de BaSO<sub>4</sub>, pressée en comprimés et mesurée pour la réflectance diffuse.
  - Film mince : Placer sur un substrat en verre et mesurer la transmission/réflexion.
- **Environnement** : température ambiante, air sec (HR<50%).
- **Analyse des données** :
  - **Absorption NIR** : le taux d'absorption à 1 000 nm est d'environ 70 % (x = 0,32, environ 20 nm), et la position du pic se décale vers le rouge d'environ 200 nm à mesure que x augmente.
  - **Transmittance** : 400–700 nm, film mince (~100 nm) ~80 %, réflectance diffuse de la poudre ~50 %.
  - **Bande interdite** : méthode du tracé de Tauc, bande interdite indirecte ~2,5 eV (x=0,32), inférieure à WO<sub>3</sub> (~3,2 eV).
  - **LSPR** : largeur du pic d'absorption ~ 500 nm, amélioration ~ 15 % avec la diminution de la taille des particules (50 → 10 nm).
- **Résultats quantitatifs** :
  - **Coefficient d'absorption** : ~10<sup>5</sup> cm<sup>-1</sup> (1000 nm), meilleur que l'ITO (~10<sup>4</sup> cm<sup>-1</sup>).
  - **Stabilité au vieillissement** : 1000 h d'irradiation UV, atténuation de l'absorption NIR < 5 %.
  - **Électrochrome** : tension de 2 V, changement de transmittance ~60 %.
- **application** :
  - Film pour fenêtre intelligente : taux de blindage NIR ~ 70 %, économie d'énergie ~ 50 %.
  - Conversion photothermique : Absorption d'énergie solaire ~60%.
  - Test de qualité : Vérifier les performances NIR des particules hydrothermales (erreur < 3%).
- **limitation** :
  - Interférence de diffusion : grosses particules (> 50 nm) erreur de réflexion diffuse ~ 10 %.
  - Sensibilité à l'épaisseur du film : la transmittance diminue d'environ 20 % avec le changement d'épaisseur (50→200 nm).
  - Coût : Instrument ~100 000 USD, maintenance ~5 000 USD/an.

L'UV-Vis-NIR est la technologie de base pour caractériser les propriétés optiques du Cs<sub>x</sub>WO<sub>3</sub>.

#### 4.5 Méthodes d'essai électrique et thermique du bronze au césium tungstène

Des méthodes de tests électriques et thermiques ont été utilisées pour quantifier la conductivité électrique (~10<sup>3</sup> S/cm), le comportement des porteurs de charge, la conductivité thermique (~1,5 W/(m·K)) et la stabilité thermique (> 500°C) de Cs<sub>x</sub>WO<sub>3</sub>.

#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

- **Test électrique :**
  - **Méthode des quatre sondes :**
    - **Principe :** Appliquer un courant constant ( $\sim 1$  mA), mesurer la tension et calculer la conductivité.
    - **Instrument :** Sourcemètre Keithley 2635B, espacement des sondes  $\sim 1$  mm.
    - **Échantillons :** Films minces ( $\sim 100$  nm) ou poudres pressées ( $\sim 1$  mm d'épaisseur).
    - **Résultats :** Film Cs<sub>0.32</sub>WO<sub>3</sub>  $\sim 1200$  S/cm, poudre  $\sim 800$  S/cm, résistance aux joints de grains diminuée d'environ 30 %.
  - **Effet Hall :**
    - **Principe :** La tension de Hall est mesurée dans un champ magnétique ( $\sim 1$  T) pour déterminer la concentration des porteurs ( $\sim 10^{20}$  cm<sup>-3</sup>) et la mobilité ( $\sim 10$  cm<sup>2</sup>/(V·s)).
    - **Instrument :** Lake Shore 8404, intensité du champ magnétique 0,5–1,5 T.
    - **Résultats :** semi-conducteur de type n, durée de vie du porteur  $\sim 1$  ps, augmentation de la concentration  $\sim 20\%$  lorsque  $x=0,5$ .
  - **Applications :** Capteurs (NO<sub>2</sub>,  $\sim 10$  ppm), électrodes de batterie (cycles  $\sim 1000$  fois).
- **Essais thermiques :**
  - **Conductivité thermique :**
    - **Principe :** L'algorithme Laser Flash (LFA) mesure la diffusivité thermique et calcule la conductivité thermique.
    - **Instrument :** Netzsch LFA 467, impulsion laser  $\sim 10$  ms.
    - **Échantillon :** comprimé pressé (diamètre  $\sim 12,7$  mm, épaisseur  $\sim 1$  mm).
    - **Résultats :**  $\sim 1,5$  W/(m·K) ( $\sim 20$  nm),  $\sim 15\%$  d'augmentation de la taille des particules (50 nm).
  - **Stabilité thermique :**
    - **Principe :** La calorimétrie différentielle à balayage (DSC) et l'analyse thermogravimétrique (ATG) mesurent la température de décomposition et la perte de masse.
    - **Instrument :** TA Instruments Q600, vitesse de chauffe  $\sim 10^\circ\text{C}/\text{min}$ .
    - **Résultats :** Température de décomposition  $\sim 650^\circ\text{C}$ , taux d'oxydation à  $500^\circ\text{C} < 0,01$  mg/cm<sup>2</sup>·h.
  - **Applications :** Revêtements d'isolation thermique (refroidissement  $\sim 10^\circ\text{C}$ ), électrodes haute température (atténuation  $< 5\%$ ).
- **Résultats quantitatifs :**
  - **Stabilité de conductivité :**  $300^\circ\text{C}$ , décroissance  $< 10\%$ .
  - **Coefficient de dilatation thermique :**  $\sim 8 \times 10^{-6}$  K<sup>-1</sup>, meilleur que l'ITO ( $\sim 10 \times 10^{-6}$  K<sup>-1</sup>).
  - **Erreur de test :** électrique  $< 3\%$ , thermique  $< 5\%$ .
- **limitation :**

**COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT**

- Électrique : La résistance de contact affecte les tests de poudre, erreur d'environ 5 %.
- Thermique : Effet d'interface des nanoparticules, erreur de conductivité thermique ~10 %.
- Coût : Instruments électriques ~ 50 000 USD, Thermiques ~ 150 000 USD.

Cas : CTIA GROUP LTD utilise la méthode à quatre sondes et LFA pour tester le film mince  $\text{Cs}_{0.32}\text{WO}_3$ , avec une conductivité électrique d'environ 1200 S/cm et une conductivité thermique d'environ 1,5 W/( m·K ), optimisant ainsi les performances des films pour fenêtres intelligentes (NIR~75%).

Les tests électriques et thermiques fournissent une base quantitative pour les applications fonctionnelles du  $\text{Cs}_x\text{WO}_3$ .

**COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT**

## Cesium Tungsten Bronze Product Introduction

CTIA GROUP LTD

### 1. Cesium Tungsten Bronze Overview

Cesium Tungsten Bronze ( $Cs_xWO_3$ ,  $0 < x \leq 1$ ) produced by CTIA GROUP is manufactured using advanced solvothermal and chemical vapor deposition processes, ensuring high purity and excellent optoelectronic performance. Cesium tungsten bronze is a nano-functional material widely applied in energy-saving glass, optoelectronics, catalysis, batteries, and biomedical fields due to its outstanding near-infrared (NIR) shielding performance, high visible light transmittance, and electrochemical stability. Its unique tungsten-oxygen-cesium crystal structure makes it the preferred material for smart materials and new energy applications.

### 2. Cesium Tungsten Bronze Features

Chemical composition:  $Cs_xWO_3$  ( $x = 0.2-0.33$ ), purity  $\geq 99.9\%$ , extremely low impurities.

Appearance: Deep blue nanopowder or thin film; cubic or hexagonal crystal structure.

Near-infrared shielding: NIR shielding rate  $> 90\%$  (800–2500 nm), suitable for energy-saving glass.

Visible light transmittance: Transmittance  $> 70\%$  (400–700 nm), supporting smart window applications.

Electrical conductivity:  $\sim 10^3$  S/cm, ideal for optoelectronic sensors and battery electrodes.

Chemical stability: Corrosion rate  $< 0.002$  mm/year, acid and alkali resistant, suitable for catalytic environments.

Versatility: Supports electrochromic, photothermal conversion, and biocompatible coatings.

### 3. Cesium Tungsten Bronze Product Specifications

Type	Particle Size (nm)	Purity (wt%)	Bulk Density (g/cm <sup>3</sup> )	Cesium Content (wt%)	Impurities (wt%, Max)
Nano-grade	30–50	$\geq 99.9$	2.5–3.0	5.0–8.0	Fe $\leq 0.002$ , Si $\leq 0.001$ , O $\leq 0.05$

### 4. Cesium Tungsten Bronze 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 anti-oxidation storage.

Quality assurance: Each batch is accompanied by a quality certificate containing the following test data:

- Purity (ICP-MS,  $> 99.9\%$ )
- Particle size distribution (laser diffraction)
- Crystal structure (XRD)
- Cesium content (chemical titration)
- Surface morphology (SEM)

### 5. Cesium Tungsten Bronze Procurement Information

Email: [sales@chinatungsten.com](mailto:sales@chinatungsten.com)

Phone: +86 592 5129595

Website: For more information about cesium tungsten bronze, please visit China Tungsten Online (<http://www.cesium-tungsten-bronze.com/>).

#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

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

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



## Chapitre 5 : Applications optiques et thermiques du bronze au césium et au tungstène

Le bronze au césium tungstène ( $CsxWO_3$ ,  $0 < x \leq 1$ ) présente un large potentiel d'application dans les domaines de l'optique et de la thermique grâce à son excellente absorption dans le proche infrarouge (NIR) ( $\sim 70\%$  à  $1\ 000\text{ nm}$ ), sa transmission lumineuse visible élevée ( $\sim 80\%$  à  $400\text{--}700\text{ nm}$ ), sa faible conductivité thermique ( $\sim 1,5\text{ W}/(\text{m}\cdot\text{K})$ ) et sa stabilité thermique élevée ( $> 500\text{ }^\circ\text{C}$ ). Ce chapitre détaille l'application du  $CsxWO_3$  dans les films pour vitrages intelligents et les vitrages à économie d'énergie, les revêtements de protection NIR, la conversion photothermique et l'utilisation de l'énergie solaire, les capteurs et détecteurs optiques, ainsi que les matériaux de gestion thermique. Il analyse son principe de fonctionnement, la conception de ses matériaux, ses indicateurs de performance, son procédé de préparation, les cas concrets, ses avantages et ses limites, et fournit des références techniques pour les économies d'énergie, l'optoélectronique et la gestion thermique.

### 5.1 Film pour fenêtre intelligent en bronze césium tungstène et verre à économie d'énergie

Les films pour fenêtres intelligents et le verre à économie d'énergie utilisent le blindage NIR et les propriétés électrochromiques du  $CsxWO_3$  pour réguler dynamiquement la lumière et la chaleur et réduire la consommation d'énergie du bâtiment ( $\sim 50\%$ ).

- **Principe de fonctionnement :**
  - **Blindage NIR** : les nanoparticules de  $CsxWO_3$  ( $\sim 20\text{ nm}$ ) absorbent le NIR ( $800\text{--}2500\text{ nm}$ ,  $\sim 70\%$ ) via la résonance plasmonique de surface localisée (LSPR) tout en maintenant une transmittance de la lumière visible d'environ  $80\%$ .
  - **Électrochrome** : En appliquant une tension ( $\sim 2\text{ V}$ ),  $Cs^+$  et une injection/extraction

#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

d'électrons, en modifiant le rapport  $W^{5+} / W^{6+}$ , la transmittance peut être ajustée à ~60 %.

- **Mécanisme d'économie d'énergie** : bloque la chaleur NIR, réduit la consommation d'énergie de la climatisation et abaisse la température intérieure d'environ 5 à 10 °C.
- **Conception matérielle** :
  - **Nanoparticules** :  $Cs_{0.32}WO_3$  (~20 nm), pic d'absorption NIR ~1000 nm, dispersées dans une matrice PVB (polyvinylbutyral).
  - **Structure du film** : conception à trois couches ( $Cs_xWO_3$ /PVB/couche protectrice), épaisseur ~100–200  $\mu m$ , vieillissement anti-UV (>1000 h).
  - **Optimisation du dopage** :  $x = 0,32$ , équilibrant le blindage NIR (~70%) et la transmittance (~80%).
- **Processus de préparation** :
  - **Méthodes** :  $Cs_xWO_3$  (~20 nm) a été synthétisé par méthode solvothermale puis formé en films par revêtement par centrifugation ou par pulvérisation.
  - **Paramètres** : rapport massique PVB/ $Cs_xWO_3$  ~10:1, température de durcissement ~120°C, temps ~2 h.
  - **Équipement** : Spin coater (~2000 rpm), four (résistance en température >200°C).
- **Indicateurs de performance** :
  - **Taux de blindage NIR** : ~70% (1000 nm), meilleur que l'ITO (~40%).
  - **Transmission de la lumière visible** : ~80% (400–700 nm), conforme aux normes de construction (GB/T 2680).
  - **Électrochrome** : temps de réponse < 5 s, durée de vie du cycle > 10 000 fois.
  - **Efficacité énergétique** : consommation énergétique du bâtiment réduite d'environ 50 %, économie annuelle d'environ 100 kWh/m<sup>2</sup>.
- **Cas réel** :
  - En 2024, un bâtiment écologique à Shanghai utilise un film de fenêtre intelligent  $Cs_xWO_3$  ( $x = 0,32$ , ~ 20 nm), d'une superficie d'environ 1 000 m<sup>2</sup>, réduisant la température intérieure d'environ 8 °C en été, économisant environ 40 % et une valeur marchande d'environ 10 millions de dollars américains.
  - Un immeuble de bureaux au Japon utilise du verre à économie d'énergie  $Cs_xWO_3$ , qui protège le NIR d'environ 75 % et permet d'économiser environ 30 % sur les factures d'électricité annuelles.
- **Avantages et limites** :
  - **Avantages** : Blindage NIR très efficace, faible coût (~50 USD/m<sup>2</sup> vs. ITO ~100 USD/m<sup>2</sup>), électrochrome flexible.
  - **Limitations** : Le film a une résistance limitée aux rayures (dureté Mohs ~3), et la transmittance diminue d'environ 10 % après un vieillissement à long terme (> 5 ans).
  - **Amélioration** : Couche protectrice  $SiO_2$  ajoutée, dureté augmentée d'environ 5, durabilité prolongée d'environ 2 ans.
- **Perspectives d'application** : Le marché des films pour fenêtres intelligentes devrait

#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

atteindre 1 milliard de dollars américains en 2030, et CsxWO<sub>3</sub> favorisera la popularisation des bâtiments écologiques.

## 5.2 Revêtement de protection proche infrarouge en bronze au césium tungstène

de protection NIR de CsxWO<sub>3</sub> est utilisé dans le verre automobile, l'aérospatiale et les équipements électroniques pour bloquer le rayonnement thermique et améliorer le confort et l'efficacité énergétique.

- **Principe de fonctionnement :**
  - Les nanoparticules de CsxWO<sub>3</sub> (~10–20 nm) absorbent le NIR (~70 %) via les transitions LSPR et W<sup>5+</sup> / W<sup>6+</sup>, abaissant la température de surface d'environ 10 °C.
  - Le revêtement maintient une transmission de la lumière visible d'environ 75 %, répondant aux normes de sécurité automobile (SAE J1796).
- **Conception matérielle :**
  - **Composants :** Cs<sub>0.32</sub>WO<sub>3</sub> (~15 nm), dispersé dans une matrice acrylique ou polyuréthane, avec des additifs (tels que TiO<sub>2</sub>) pour améliorer la résistance aux UV.
  - **Épaisseur du revêtement :** ~10–50 µm, concentration en particules ~5 % en poids.
  - **Modification de surface :** L'agent de couplage au silane (KH-550) améliore la dispersion des particules et l'uniformité du revêtement < 5 % d'erreur.
- **Processus de préparation :**
  - **Méthode :** Méthode solvothermale ou synthèse verte de CsxWO<sub>3</sub>, pulvérisation ou laminage pour former un film.
  - **Paramètres :** pression de pulvérisation ~0,2 MPa, température de durcissement ~80°C, temps ~1 h.
  - **Équipement :** Pulvérisateur haute pression (~5000 USD), four de durcissement infrarouge.
- **Indicateurs de performance :**
  - **Taux de blindage NIR :** ~70% (1000 nm), réduisant la température dans l'habitacle de la voiture d'environ 7°C.
  - **Transmission de la lumière :** ~75 % (400–700 nm), meilleure que les revêtements colorants traditionnels (~50 %).
  - **Résistance aux intempéries :** vieillissement de la lampe au xénon 5000 h, atténuation des performances NIR < 5 %.
  - **Adhérence :** ASTM D3359, Grade 5B (pas de pelage).
- **Cas réel :**
  - En 2023, une certaine marque de véhicules électriques a utilisé un revêtement CsxWO<sub>3</sub> (~20 nm) sur le pare-brise avant, avec un blindage NIR d'environ 72 % et une augmentation de l'autonomie d'environ 5 % (~20 km).
  - Aérospatiale : le revêtement CsxWO<sub>3</sub> est utilisé pour les hublots d'avions, poids ~ 0,1 kg/m<sup>2</sup>, réduction de la charge thermique ~ 30 %.
- **Avantages et limites :**

### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

- **Avantages** : Léger ( $\sim 0,1 \text{ kg/m}^2$  vs. revêtement Ag  $\sim 0,5 \text{ kg/m}^2$ ), faible coût ( $\sim 20 \text{ USD/m}^2$ ).
- **Limitations** : L'épaisseur inégale du revêtement ( $> 50 \mu\text{m}$ ) réduit la transmittance d'environ 15 %, les déchets de pulvérisation d'environ 10 %.
- **Amélioration** : Pulvérisation électrostatique, déchets réduits d'environ 50 %, uniformité augmentée d'environ 10 %.
- **Perspectives d'application** : Le marché des revêtements NIR automobiles devrait atteindre 500 millions de dollars américains en 2025, et le  $\text{CsxWO}_3$  remplacera les matériaux traditionnels.

### 5.3 Conversion photothermique et utilisation de l'énergie solaire du bronze au césium tungstène

La conversion photothermique du  $\text{CsxWO}_3$  utilise son absorption NIR ( $\sim 70\%$ ) pour convertir l'énergie solaire en énergie thermique pour des applications dans les capteurs solaires et la production d'énergie thermoélectrique.

- **Principe de fonctionnement** :
  - Le  $\text{CsxWO}_3$  absorbe le NIR (800–2500 nm, environ 60 % de l'énergie solaire), générant de l'énergie thermique et augmentant la température de surface d'environ 100–200 °C.
  - La faible émissivité ( $\sim 0,2$ , 8–14  $\mu\text{m}$ ) réduit les pertes de rayonnement thermique et l'efficacité de conversion de chaleur est d'environ 60 %.
- **Conception matérielle** :
  - **Structure** :  $\text{CsxWO}_3$  ( $\sim 20 \text{ nm}$ ) est dopé dans une matrice céramique (comme  $\text{Al}_2\text{O}_3$ ) ou déposé sur une plaque collectrice métallique (Cu).
  - **Matériau composite** :  $\text{CsxWO}_3$ /graphène (1:0,1), conductivité thermique augmentée d'environ 20 % (environ  $2 \text{ W/(m}\cdot\text{K)}$ ).
  - **Épaisseur** :  $\sim 10\text{--}100 \mu\text{m}$ , équilibre absorption/dissipation thermique optimisé.
- **Processus de préparation** :
  - **Méthode** :  $\text{CsxWO}_3$  a été synthétisé par la méthode sol-gel et pulvérisé ou sérigraphié.
  - **Paramètres** : température de durcissement  $\sim 200^\circ\text{C}$ , temps  $\sim 2 \text{ h}$ , uniformité du revêtement  $< 3\%$  d'erreur.
  - **Équipement** : Machine de sérigraphie ( $\sim 10\,000 \text{ USD}$ ), four haute température.
- **Indicateurs de performance** :
  - **Efficacité photothermique** :  $\sim 60\%$  (AM1.5,  $1000 \text{ W/m}^2$ ), meilleure que le noir de carbone ( $\sim 50\%$ ).
  - **Température de fonctionnement** :  $\sim 150\text{--}250^\circ\text{C}$ , stabilité  $> 1000 \text{ h}$ .
  - **Conversion thermoélectrique** : module  $\text{CsxWO}_3$ /thermoélectrique, puissance de sortie  $\sim 100 \text{ W/m}^2$ .
- **Cas réel** :
  - En 2024, un chauffe-eau solaire utilise un revêtement  $\text{CsxWO}_3$  ( $\sim 50 \mu\text{m}$ ), avec

#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

une efficacité de collecte thermique d'environ 62 % et une augmentation du débit d'eau chaude d'environ 30 % (~100 L/m<sup>2</sup>·jour).

- Production d'énergie thermoélectrique : le collecteur CsxWO<sub>3</sub> entraîne le module Bi<sub>2</sub>Te<sub>3</sub>, efficacité ~5%, coût ~200 USD/m<sup>2</sup>.

- **Avantages et limites :**

- **Avantages :** Absorption NIR haute efficacité, résistance aux hautes températures (>500°C), faible coût (~30 USD/m<sup>2</sup>).
- **Limitations :** Faible conductivité thermique (~1,5 W/( m·K )), efficacité de transfert de chaleur réduite d'environ 10 % ; aucune génération de chaleur la nuit.
- **Amélioration :** Ajout de CNT, conductivité thermique augmentée d'environ 50 %, efficacité augmentée d'environ 15 %.

- **Perspectives d'application :** Le marché de l'utilisation de l'énergie solaire thermique devrait atteindre 5 milliards de dollars américains en 2030, et le CsxWO<sub>3</sub> favorisera l'énergie à faible émission de carbone.

#### 5.4 Capteurs et détecteurs optiques en bronze césium tungstène

Les capteurs et détecteurs optiques de CsxWO<sub>3</sub> tirent parti de sa réponse NIR (~70%) et de ses propriétés électrochromes pour des applications de détection de gaz et de photodétection.

- **Principe de fonctionnement :**

- **Capteur NIR :** CsxWO<sub>3</sub> (~20 nm) absorbe le NIR, générant des porteurs photogénérés et provoquant un changement de conductivité d'environ 10 % (~10 ppm NO<sub>2</sub>).
- **Détecteur électrochrome :** la tension (~1 V) entraîne un changement de transmittance d'environ 50 %, détectant l'intensité lumineuse ou la concentration de gaz.
- **Mécanisme :** changement d'état de valence W<sup>5+</sup> / W<sup>6+</sup> et réponse photoélectrique améliorée par LSPR.

- **Conception matérielle :**

- **Structure :** Film mince de CsxWO<sub>3</sub> (~50 nm) déposé sur substrat ITO, espacement des électrodes ~10 μm .
- **Dopage :** x=0,32, réponse photoélectrique optimisée (sensibilité ~10<sup>-4</sup> A/W).
- **Matériau composite :** CsxWO<sub>3</sub>/SnO<sub>2</sub> (1:1), sensibilité augmentée d'environ 30 %.

- **Processus de préparation :**

- **Méthodes :** Films minces déposés par CVD ou sol-gel, électrodes microfabriquées.
- **Paramètres :** température de dépôt ~400°C, recuit ~300°C, temps ~1 h.
- **Équipement :** réacteur CVD, machine de photolithographie (~100 000 USD).

- **Indicateurs de performance :**

- **Sensibilité :** NO<sub>2</sub> (~10 ppm), temps de réponse <5 s, temps de récupération <10 s.
- **Réponse photoélectrique :** 1000 nm, ~10<sup>-4</sup> A/W, meilleure que Si (~10<sup>-3</sup> A/W).
- **Stabilité :** 5000 cycles, dégradation des performances <3%.

#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

- **Cas réel :**
  - En 2023, une station de surveillance environnementale utilise des capteurs CsxWO<sub>3</sub> (~50 nm) pour détecter le CO (~50 ppm) avec une précision de >95%.
  - Détection infrarouge : les films CsxWO<sub>3</sub> sont utilisés dans les équipements de vision nocturne, avec une longueur d'onde de réponse d'environ 800 à 1 500 nm.
- **Avantages et limites :**
  - **Avantages :** Haute sensibilité NIR, faible consommation d'énergie (~1 mW ), faible coût (~10 USD/unité).
  - **Limitations :** L'interférence de l'humidité (HR>80%) réduit la sensibilité d'environ 20%, sélectivité limitée.
  - **Amélioration :** Modification de surface (PDDA), sélectivité augmentée d'environ 50 %, résistance à l'humidité augmentée d'environ 30 %.
- **Perspectives d'application :** Le marché des capteurs optiques devrait atteindre 2 milliards de dollars américains en 2025, et CsxWO<sub>3</sub> sera étendu à l'Internet des objets.

### Matériaux de gestion thermique en bronze césium-tungstène

Les matériaux de gestion thermique CsxWO<sub>3</sub> sont utilisés dans l'isolation thermique et les dispositifs à haute température en raison de leur faible conductivité thermique (~1,5 W/( m·K )) et de leur stabilité thermique élevée (>500°C).

- **Principe de fonctionnement :**
  - **Isolation thermique :** les nanoparticules de CsxWO<sub>3</sub> (~20 nm) réduisent la conductivité thermique par diffusion des phonons, bloquant le flux de chaleur et réduisant la température d'environ 10°C.
  - **Stabilité à haute température :** taux d'oxydation < 0,01 mg/cm<sup>2</sup>·h à 500°C, adapté aux environnements à haute température.
- **Conception matérielle :**
  - **Structure :** CsxWO<sub>3</sub> (~20 nm) dopé dans un gel de silice ou une matrice céramique, concentration ~10 % en poids .
  - **Matériau composite :** CsxWO<sub>3</sub>/SiO<sub>2</sub> (1:2), conductivité thermique diminuée d'environ 20 % (environ 1,2 W/( m·K )).
  - **Épaisseur :** ~100–500 μm , rapport isolation/poids optimisé.
- **Processus de préparation :**
  - **Méthode :** Synthèse verte de CsxWO<sub>3</sub>, méthode de mélange ou formation de film par pulvérisation.
  - **Paramètres :** Température de mélange ~60°C, durcissement ~120°C, temps ~2 h.
  - **Équipement :** mélangeur à grande vitesse (~5000 tr/min), pulvérisateur.
- **Indicateurs de performance :**
  - **Conductivité thermique :** ~1,5 W/( m·K ), meilleure que la fibre de verre (~2 W/( m·K )).
  - **Effet isolant :** source de chaleur à 100°C, la température de surface chute d'environ 10°C.

#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

- **Stabilité** : 500°C, 1000 h, dégradation des performances <5%.
- **Cas réel** :
  - En 2024, CTIA GROUP LTD a développé un revêtement d'isolation thermique CsxWO<sub>3</sub> (~200 μm ) pour les batteries de véhicules électriques, réduisant le flux de chaleur d'environ 30 % et améliorant la sécurité d'environ 20 %.
  - Four industriel : revêtement céramique CsxWO<sub>3</sub>, perte de chaleur réduite d'environ 25 %, économie d'énergie d'environ 15 %.
- **Avantages et limites** :
  - **Avantages** : faible conductivité thermique, grande stabilité, faible coût (~15 USD/m<sup>2</sup>).
  - **Limites** : Faible résistance mécanique (résistance à la compression ~10 MPa), les revêtements épais (>500 μm ) sont sujets à la fissuration.
  - **Amélioration** : L'ajout de fibres Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> augmente la résistance d'environ 50 % et la durabilité d'environ 30 %.
- **Perspectives d'application** : Le marché de la gestion thermique devrait atteindre 3 milliards de dollars américains en 2030, et CsxWO<sub>3</sub> favorisera une nouvelle sécurité énergétique.

**COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT**

## Cesium Tungsten Bronze Product Introduction

CTIA GROUP LTD

### 1. Cesium Tungsten Bronze Overview

Cesium Tungsten Bronze ( $Cs_xWO_3$ ,  $0 < x \leq 1$ ) produced by CTIA GROUP is manufactured using advanced solvothermal and chemical vapor deposition processes, ensuring high purity and excellent optoelectronic performance. Cesium tungsten bronze is a nano-functional material widely applied in energy-saving glass, optoelectronics, catalysis, batteries, and biomedical fields due to its outstanding near-infrared (NIR) shielding performance, high visible light transmittance, and electrochemical stability. Its unique tungsten-oxygen-cesium crystal structure makes it the preferred material for smart materials and new energy applications.

### 2. Cesium Tungsten Bronze Features

Chemical composition:  $Cs_xWO_3$  ( $x = 0.2-0.33$ ), purity  $\geq 99.9\%$ , extremely low impurities.

Appearance: Deep blue nanopowder or thin film; cubic or hexagonal crystal structure.

Near-infrared shielding: NIR shielding rate  $>90\%$  (800–2500 nm), suitable for energy-saving glass.

Visible light transmittance: Transmittance  $>70\%$  (400–700 nm), supporting smart window applications.

Electrical conductivity:  $\sim 10^3$  S/cm, ideal for optoelectronic sensors and battery electrodes.

Chemical stability: Corrosion rate  $<0.002$  mm/year, acid and alkali resistant, suitable for catalytic environments.

Versatility: Supports electrochromic, photothermal conversion, and biocompatible coatings.

### 3. Cesium Tungsten Bronze Product Specifications

Type	Particle Size (nm)	Purity (wt%)	Bulk Density (g/cm <sup>3</sup> )	Cesium Content (wt%)	Impurities (wt%, Max)
Nano-grade	30–50	$\geq 99.9$	2.5–3.0	5.0–8.0	Fe $\leq 0.002$ , Si $\leq 0.001$ , O $\leq 0.05$

### 4. Cesium Tungsten Bronze 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 anti-oxidation storage.

Quality assurance: Each batch is accompanied by a quality certificate containing the following test data:

- Purity (ICP-MS,  $>99.9\%$ )
- Particle size distribution (laser diffraction)
- Crystal structure (XRD)
- Cesium content (chemical titration)
- Surface morphology (SEM)

### 5. Cesium Tungsten Bronze Procurement Information

Email: [sales@chinatungsten.com](mailto:sales@chinatungsten.com)

Phone: +86 592 5129595

Website: For more information about cesium tungsten bronze, please visit China Tungsten Online (<http://www.cesium-tungsten-bronze.com/>).

#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

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

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



## Chapitre 6 : Applications énergétiques et environnementales du bronze au césium et au tungstène

Le bronze césium tungstène ( $CsxWO_3$ ,  $0 < x \leq 1$ ) présente un fort potentiel pour le stockage et la conversion d'énergie, ainsi que pour la protection de l'environnement, en raison de sa conductivité élevée ( $\sim 10^3$  S/cm), de son excellente absorption dans le proche infrarouge (NIR) ( $\sim 70\%$  à  $1\ 000$  nm), de ses propriétés semi-conductrices (bande interdite  $\sim 2,5$  eV) et de sa stabilité chimique ( $>500$  °C). Ce chapitre détaille l'application du  $CsxWO_3$  dans les batteries lithium-ion et les supercondensateurs, la photocatalyse et la décomposition de l'eau, la purification de l'air et l'adsorption des polluants, les matériaux d'électrodes pour piles à combustible, ainsi que le stockage de l'hydrogène et le stockage d'énergie. Il analyse également son principe de fonctionnement, sa conception, ses indicateurs de performance, son procédé de préparation, ses cas concrets, ses avantages et ses limites, et fournit des références techniques pour les nouvelles technologies énergétiques et de protection de l'environnement.

### 6.1 Batteries et supercondensateurs lithium-ion césium tungstène bronze

batteries lithium-ion (LIB) et supercondensateurs en utilisant sa conductivité élevée et sa nanostructure ( $\sim 20$  nm).

- **Principe de fonctionnement :**
  - **Batterie lithium-ion :**  $CsxWO_3$  comme matériau d'électrode négative,  $Li^+$  inséré/extrait dans l'espace octaédrique  $WO_6$ , capacité théorique  $\sim 200$  mAh/g. Le changement d'état de valence  $W^{5+} / W^{6+}$  prend en charge le stockage de charge.
  - **Supercondensateurs :** Le  $CsxWO_3$  stocke la charge via une pseudocapacité (redox de surface) et une capacité double couche (surface spécifique élevée  $\sim 80$  m<sup>2</sup>/g), avec une densité de puissance d'environ 10 kW/kg.

#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

- **Mécanisme** : Le dopage Cs<sup>+</sup> (x~0,32) améliore la conductivité (~10<sup>3</sup> S/cm) et réduit la résistance interne d'environ 20 %.
- **Conception matérielle** :
  - **Nanoparticules** : Cs<sub>0.32</sub>WO<sub>3</sub> (~20 nm), augmentent le coefficient de diffusion du Li<sup>+</sup> à ~ 10<sup>-10</sup>cm<sup>2</sup> / s.
  - **Matériau composite** : Cs<sub>x</sub>WO<sub>3</sub>/graphène (1:0,2), conductivité augmentée d'environ 50 % (environ 1 500 S/cm), capacité augmentée d'environ 30 %.
  - **Structure** : Électrode poreuse (porosité ~40%), pénétration électrolytique améliorée, stabilité du cycle augmentée d'environ 20%.
- **Processus de préparation** :
  - **Méthodes** : Cs<sub>x</sub>WO<sub>3</sub> a été synthétisé par la méthode solvothermale, et l'électrode composite a été préparée par la méthode de mélange et revêtue sur une feuille de Cu.
  - **Paramètres** : suspension (Cs<sub>x</sub>WO<sub>3</sub>:PVDF: noir de carbone conducteur = 8:1:1), épaisseur du revêtement ~50 μm , séchage à 120°C, 2 h.
  - **Équipement** : Broyeur planétaire à boulets (~500 tr/min), enrobeuse (~10 m/min).
- **Indicateurs de performance** :
  - **LIB** : Capacité ~180 mAh /g (0,1C), 1000 cycles, rétention de capacité ~85%.
  - **Supercondensateurs** : capacité spécifique ~200 F/g (1 A/g), densité de puissance ~10 kW/kg, densité d'énergie ~50 Wh /kg.
  - **Efficacité de charge et de décharge** : ~98%, meilleure que WO<sub>3</sub> (~90%).
  - **Température de fonctionnement** : -20–60°C, dégradation des performances <5%.
- **Cas réel** :
  - En 2024, une certaine batterie de véhicule électrique utilise une électrode négative Cs<sub>x</sub>WO<sub>3</sub>/graphène, avec une densité énergétique d'environ 200 Wh /kg et une autonomie augmentée d'environ 10 % (environ 50 km).
  - Supercondensateur : les électrodes Cs<sub>x</sub>WO<sub>3</sub> sont utilisées dans les systèmes de stockage d'énergie avec un temps de charge < 1 min et une durée de vie > 10 000 fois.
- **Avantages et limites** :
  - **Avantages** : Haute conductivité, longue durée de vie, faible coût (~500 USD/kg contre LiCoO<sub>2</sub>~1000 USD/kg).
  - **Limitations** : La première perte de capacité irréversible est d'environ 20 %, et l'expansion volumique est d'environ 10 %, ce qui entraîne une fissuration de l'électrode.
  - **Amélioration** : revêtement SiO<sub>2</sub>, expansion réduite d'environ 50 %, rétention de capacité augmentée d'environ 10 %.
- **Perspectives d'application** : Le marché des LIB et des supercondensateurs devrait atteindre 50 milliards de dollars américains en 2030, et Cs<sub>x</sub>WO<sub>3</sub> favorisera le stockage d'énergie haute performance.

## 6.2 Photocatalyse et décomposition aqueuse du bronze césium tungstène

### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

Le CsxWO<sub>3</sub> est utilisé comme photocatalyseur pour favoriser la production d'hydrogène à partir de la séparation de l'eau et de la dégradation des polluants en utilisant sa bande interdite (~2,5 eV) et sa réponse NIR (~70%).

- **Principe de fonctionnement :**

- **Photocatalyse :** CsxWO<sub>3</sub> absorbe la lumière proche infrarouge et visible (200–1000 nm), excite les paires électron-trou et entraîne la génération de H<sub>2</sub> dans la bande de conduction (CB) ~ 0,5 V (par rapport à NHE) et oxyde H<sub>2</sub>O ou les polluants dans la bande de valence (VB) ~ 3,0 V.
- **Décomposition de l'eau :** 2H<sub>2</sub>O → 2H<sub>2</sub> + O<sub>2</sub>, CsxWO<sub>3</sub> efficacité de production d'hydrogène ~200 μmol / (g·h).
- **Dégradation des polluants :** CsxWO<sub>3</sub> décompose les colorants (tels que la Rhodamine B) avec une efficacité d'environ 85 %.

- **Conception matérielle :**

- **Nanoparticules :** Cs<sub>0.32</sub>WO<sub>3</sub> (~10 nm), surface spécifique ~100 m<sup>2</sup>/g, absorption lumineuse améliorée.
- **Matériau composite :** CsxWO<sub>3</sub>/TiO<sub>2</sub> (1:1), efficacité de séparation électron-trou augmentée d'environ 30 %, taux de production d'hydrogène augmenté d'environ 50 %.
- **Dopage :** x=0,32, rapport W<sup>5+</sup> ~15%, amélioration de la réponse NIR ~20%.

- **Processus de préparation :**

- **Méthode :** Synthèse verte de CsxWO<sub>3</sub> et préparation de photocatalyseur composite par méthode sol-gel.
- **Paramètres :** pH ~ 8, température de calcination ~ 400 °C, temps ~ 4 h.
- **Équipement :** réacteur micro-ondes (~1000 W), centrifugeuse (~5000 rpm).

- **Indicateurs de performance :**

- **Efficacité de production d'hydrogène :** ~200 μmol / (g·h) (AM1.5, 1000 W/m<sup>2</sup>), meilleure que WO<sub>3</sub> (~100 μmol / (g·h)).
- **Efficacité de dégradation :** Rhodamine B (10 mg/L), dégradation ~85% en 4 h, taux de minéralisation ~70%.
- **Stabilité à la lumière :** 100 h d'exposition à la lumière, décroissance d'activité < 5 %.
- **Efficacité quantique :** ~5% (600 nm), ~2% dans la région NIR.

- **Cas réel :**

- En 2023, une station d'épuration a utilisé un photocatalyseur CsxWO<sub>3</sub>/TiO<sub>2</sub> pour dégrader les eaux usées industrielles (DCO~100 mg/L) avec une efficacité d'environ 80 %.
- Production d'hydrogène solaire : le catalyseur CsxWO<sub>3</sub> est utilisé dans un réacteur de laboratoire et le coût de production d'hydrogène est d'environ 5 USD/kg H<sub>2</sub>.

- **Avantages et limites :**

- **Avantages :** réponse NIR, faible coût (~450 USD/kg), grande stabilité.
- **Limitations :** Faible efficacité quantique NIR (<5%), taux de recombinaison

**COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT**

électron-trou ~30%.

- **Amélioration** : Co-catalyse par métal précieux (Pt), taux de production d'hydrogène augmenté d'environ 100 %, taux de recombinaison diminué d'environ 50 %.
- **Perspectives d'application** : Le marché photocatalytique devrait atteindre 1 milliard de dollars américains en 2025, et le CsxWO<sub>3</sub> favorisera l'énergie verte de l'hydrogène.

### 6.3 Purification de l'air et adsorption des polluants du bronze au césium et au tungstène

Le CsxWO<sub>3</sub> élimine les composés organiques volatils (COV) et les particules (PM<sub>2,5</sub>) de l'air par oxydation photocatalytique et adsorption physique avec une efficacité d'environ 90 %.

- **Principe de fonctionnement** :
  - **Oxydation photocatalytique** : CsxWO<sub>3</sub> (~20 nm) produit des espèces réactives de l'oxygène ( $\cdot\text{OH}$ ,  $\text{O}_2^-$ ) sous excitation UV-Vis-NIR, oxydant les COV (tels que le toluène) en CO<sub>2</sub> et H<sub>2</sub>O avec une efficacité d'environ 90 %.
  - **Adsorption** : La grande surface (~80 m<sup>2</sup>/g) capture les PM<sub>2,5</sub> (~0,1–2,5 μm), avec une capacité d'adsorption d'environ 50 mg/g.
  - **Mécanisme** : W<sup>5+</sup> / W<sup>6+</sup> améliore l'activité photocatalytique et les sites Cs<sup>+</sup> favorisent l'adsorption des polluants.
- **Conception matérielle** :
  - **Structure** : Nanoparticules de Cs<sub>0.32</sub>WO<sub>3</sub> (~20 nm) supportées sur une matrice poreuse (comme du charbon actif).
  - **Matériau composite** : CsxWO<sub>3</sub>/ ZnO (1:1), efficacité photocatalytique augmentée d'environ 20 %, capacité d'adsorption augmentée d'environ 30 %.
  - **Modification de surface** : fonctionnalisation amino, affinité des COV augmentée d'environ 50 %.
- **Processus de préparation** :
  - **Méthode** : CsxWO<sub>3</sub> a été synthétisé par méthode hydrothermale et chargé sur la matrice par méthode d'imprégnation.
  - **Paramètres** : temps d'immersion ~12 h, séchage à 100°C, 2 h.
  - **Équipement** : Étuve de séchage sous vide (~5000 USD), nettoyeur à ultrasons (~500 W).
- **Indicateurs de performance** :
  - **Taux d'élimination des COV** : Toluène (~100 ppm), ~90% d'élimination en 4 h, meilleur que TiO<sub>2</sub> (~70%).
  - **Adsorption PM<sub>2.5</sub>** : ~50 mg/g, 5 cycles, capacité de rétention ~80%.
  - **Stabilité photocatalytique** : 500 h d'éclairage, décroissance d'activité < 3 %.
  - **Humidité de fonctionnement** : HR 20–80 %, fluctuation d'efficacité < 10 %.
- **Cas réel** :
  - En 2024, un purificateur d'air d'hôpital utilise un filtre CsxWO<sub>3</sub>/ ZnO, éliminant environ 92 % des COV et capturant environ 95 % des PM<sub>2,5</sub>.
  - Gaz résiduels industriels : le revêtement CsxWO<sub>3</sub> traite le formaldéhyde (~50

#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

ppm), efficacité ~85%.

- **Avantages et limites :**
  - **Avantages :** Pilotage NIR, haute efficacité, faible coût (~20 USD/m<sup>2</sup>).
  - **Limites :** Intoxication par fortes concentrations de COV (>500 ppm), régénération nécessaire après saturation d'adsorption.
  - **Amélioration :** Régénération thermique (~200°C), capacité d'adsorption récupérée ~90%.
- **Perspectives d'application :** Le marché de la purification de l'air devrait atteindre 10 milliards de dollars américains en 2030, et CsxWO<sub>3</sub> favorisera la protection de l'environnement intérieur.

#### 6.4 Matériaux d'électrodes de piles à combustible en bronze tungstène-césium

Le CsxWO<sub>3</sub> est utilisé comme support de catalyseur d'électrode de pile à combustible (PEMFC) ou comme matériau auxiliaire pour améliorer l'efficacité et la durabilité de la réaction de réduction de l'oxygène (ORR).

- **Principe de fonctionnement :**
  - **Catalyse ORR :** CsxWO<sub>3</sub> (~20 nm) fournit des sites actifs via W<sup>5+</sup> / W<sup>6+</sup>, réduisant la surtension ORR d'environ 0,1 V.
  - **Fonction de support :** Une conductivité élevée (~10<sup>3</sup> S/cm) et une stabilité (>500°C) supportent le catalyseur Pt/C, réduisant le dosage de Pt d'environ 20 %.
  - **Mécanisme :** Le dopage Cs<sup>+</sup> améliore le transfert d'électrons, densité de courant ORR ~ 5 mA/cm<sup>2</sup>.
- **Conception matérielle :**
  - **Structure :** Nanoparticules de Cs<sub>0.32</sub>WO<sub>3</sub> (~20 nm) composées de Pt (~2 nm), charge de Pt ~0,2 mg/cm<sup>2</sup>.
  - **Matériau composite :** CsxWO<sub>3</sub>/C (1:2), surface spécifique ~100 m<sup>2</sup>/g, conductivité augmentée d'environ 30 %.
  - **Assemblage d'électrodes à membrane (MEA) :** CsxWO<sub>3</sub>/Pt/C revêtu sur membrane Nafion, épaisseur ~10 μm.
- **Processus de préparation :**
  - **Méthodes :** CsxWO<sub>3</sub> a été synthétisé par la méthode solvothermale et le Pt a été chargé par la méthode de réduction chimique.
  - **Paramètres :** température de réduction du PtCl<sub>4</sub> ~80°C, pH ~9, temps ~4 h.
  - **Équipement :** Bain-marie à température constante, disperseur à ultrasons (~300 W).
- **Indicateurs de performance :**
  - **Activité ORR :** potentiel demi-onde ~0,85 V (vs. RHE), meilleur que WO<sub>3</sub> (~0,75 V).
  - **Densité de puissance :** ~1 W/cm<sup>2</sup> (60°C, H<sub>2</sub>/O<sub>2</sub>), Pt/C ~1,2 W/cm<sup>2</sup>.
  - **Durabilité :** 5000 cycles, décroissance d'activité <10%.
  - **Coût :** ~500 USD/kg (CsxWO<sub>3</sub>), utilisation de Pt réduite d'environ 20 %.

#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

- **Cas réel :**
  - En 2023, une société d'énergie hydrogène a adopté des électrodes CsxWO<sub>3</sub>/Pt/C, avec une efficacité de pile à combustible d'environ 50 % et une durée de vie de > 5 000 h.
  - Alimentation portable : le substrat CsxWO<sub>3</sub> est utilisé dans une petite PEMFC, poids ~ 1 kg, puissance ~ 100 W.
- **Avantages et limites :**
  - **Avantages :** Dosage de Pt réduit, résistance à la corrosion, faible coût.
  - **Limitations :** L'activité ORR est inférieure à celle du Pt pur (~10 mA/cm<sup>2</sup>), la dissolution du Cs<sup>+</sup> est d'environ 5 % à haute température (>80°C).
  - **Amélioration :** dopage N, activité ORR augmentée d'environ 30 %, stabilité augmentée d'environ 20 %.
- **Perspectives d'application :** Le marché des piles à combustible devrait atteindre 5 milliards de dollars américains en 2025, et le CsxWO<sub>3</sub> réduira les coûts.

## 6.5 Stockage d'hydrogène et stockage d'énergie dans le bronze au césium et au tungstène

En tant que matériau de stockage d'hydrogène, CsxWO<sub>3</sub> utilise sa structure tunnel hexagonale (x~0,32) pour stocker l'hydrogène avec une capacité d'environ 1,5 % en poids, prenant en charge le stockage d'énergie renouvelable.

- **Principe de fonctionnement :**
  - **Stockage d'hydrogène :** les molécules H<sub>2</sub> sont adsorbées physiquement/chimiquement dans le tunnel hexagonal CsxWO<sub>3</sub> (~7,4 Å), et W<sup>5+</sup> / W<sup>6+</sup> favorise la dissociation de H<sub>2</sub>.
  - **Libération :** 100–200°C, taux de désorption H<sub>2</sub> ~90%, stabilité du cycle >100 fois.
  - **Mécanisme :** les sites Cs<sup>+</sup> améliorent l'énergie d'adsorption de H<sub>2</sub> (~ 0,5 eV), capacité ~ 1,5 % en poids.
- **Conception matérielle :**
  - **Structure :** Nanoparticules de Cs<sub>0.32</sub>WO<sub>3</sub> (~20 nm), surface spécifique ~80 m<sup>2</sup>/g.
  - **Matériau composite :** CsxWO<sub>3</sub>/MgH<sub>2</sub> (1:1), capacité de stockage d'hydrogène augmentée d'environ 30 % (environ 2 % en poids).
  - **Modification de surface :** modification du Pd (~1 % en poids), efficacité de dissociation du H<sub>2</sub> augmentée d'environ 50 %.
- **Processus de préparation :**
  - **Méthode :** Synthèse verte de CsxWO<sub>3</sub> et stockage d'hydrogène en réacteur haute pression.
  - **Paramètres :** pression H<sub>2</sub> ~5 MPa, température ~150°C, temps ~12 h.
  - **Équipement :** réacteur haute pression (résistance à la pression > 10 MPa), analyseur de gaz.
- **Indicateurs de performance :**
  - **Capacité de stockage d'hydrogène :** ~1,5 % en poids (100 °C, 1 MPa), meilleure que WO<sub>3</sub> (~0,5 % en poids).

### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

- **Température de désorption** : ~150°C, besoin énergétique ~50 kJ/mol H<sub>2</sub>.
- **Stabilité du cycle** : 100 fois, rétention de capacité ~ 90 %.
- **Sécurité** : Pas de fuite d'H<sub>2</sub>, risque d'explosion <1%.
- **Cas réel** :
  - En 2024, CTIA GROUP LTD a développé un matériau de stockage d'hydrogène Cs<sub>x</sub>WO<sub>3</sub>/Pd (~20 nm) destiné à être utilisé dans les centrales électriques à hydrogène, avec une efficacité de stockage d'hydrogène d'environ 1,5 % en poids et un coût d'environ 600 USD/kg.
  - Stockage d'hydrogène portable : les matériaux composites Cs<sub>x</sub>WO<sub>3</sub> sont utilisés dans les drones, avec une capacité de stockage d'hydrogène d'environ 0,1 kg et un temps de vol d'environ 2 h.
- **Avantages et limites** :
  - **Avantages** : Stockage d'hydrogène à basse température, haute sécurité, faible coût (~600 USD/kg contre LaNi<sub>5</sub>~1000 USD/kg).
  - **Limites** : Capacité inférieure à celle des hydrures métalliques (~5 % en poids ), taux d'adsorption lent (~1 h).
  - **Amélioration** : dopage Ni, taux d'adsorption augmenté d'environ 50 %, capacité augmentée d'environ 20 %.
- **Perspectives d'application** : Le marché du stockage de l'hydrogène devrait atteindre 3 milliards de dollars américains en 2030, et le Cs<sub>x</sub>WO<sub>3</sub> soutiendra l'économie de l'hydrogène.

**COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT**



## Chapitre 7 : Production industrielle de bronze au césium et au tungstène

Le bronze au césium tungstène ( $Cs_xWO_3$ ,  $0 < x \leq 1$ ) est largement utilisé dans les films pour fenêtres intelligentes, le stockage d'énergie et la photocatalyse en raison de son excellente absorption dans le proche infrarouge (NIR) (~ 70 % à 1 000 nm), de sa conductivité élevée (~  $10^3$  S/cm) et de sa stabilité chimique (> 500 °C). La production industrielle doit relever des défis tels que l'optimisation des procédés, la maîtrise des coûts, l'échelle et l'assurance qualité. Ce chapitre examine en détail le procédé et l'équipement de production, la chaîne d'approvisionnement des matières premières et l'analyse des coûts, la technologie de production à grande échelle, le contrôle qualité et les tests, ainsi que les cas d'application commerciale du  $Cs_xWO_3$ . Il analyse également son parcours technique, son efficacité économique, ses pratiques d'industrialisation et de commercialisation, et fournit des références techniques et économiques pour promouvoir une application généralisée du  $Cs_xWO_3$ .

### 7.1 Procédé et équipement de production du bronze au césium et au tungstène

La production industrielle de  $Cs_xWO_3$  repose principalement sur les méthodes solvothermales, hydrothermales et de réaction en phase solide, associées à des post-traitements (broyage à billes, dispersion, etc.) pour répondre aux exigences de différentes applications (nanoparticules d'environ 20 nm ou films minces d'environ 100 nm). L'analyse suivante porte sur les principaux procédés et équipements.

- **Processus de production principal :**
  - **Méthode solvothermale :**
    - **Procédure :** CsOH et  $WCl_6$  sont dissous dans de l'éthanol (> 99,8 %), à 180–200 °C, 1–5 MPa, et mis à réagir pendant 12 à 24 h pour produire des

#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

nanoparticules de Cs<sub>0,32</sub>WO<sub>3</sub> (~ 10–20 nm). Centrifuger (~ 10 000 tr/min), laver (éthanol/eau) et sécher (80 °C, 6 h).

- **Réaction** :  $\text{CsOH} + \text{WCl}_6 + \text{ROH} \rightarrow \text{Cs}_x\text{WO}_3 + \text{HCl}\uparrow$  ( $x \sim 0,2-0,5$ ).
  - **Avantages** : Petite taille de particule (~10 nm), absorption NIR élevée (~70%).
  - **Équipement** : Réacteur en acier inoxydable (volume ~100–1000 L, pression >10 MPa, ~50 000 USD), centrifugeuse (~20 000 USD), étuve à vide (~10 000 USD).
- **Méthode hydrothermale** :
  - **Procédé** : Cs<sub>2</sub>CO<sub>3</sub> et (NH<sub>4</sub>)<sub>10</sub>W<sub>12</sub>O<sub>41</sub> sont dissous dans de l'eau déionisée, à 180–220 °C, 1–5 MPa, et réagissent pendant 12 à 24 h pour générer Cs<sub>x</sub>WO<sub>3</sub> (~20–50 nm). Filtrer, laver et sécher (100 °C, 4 h).
  - **Réaction** :  $\text{Cs}_2\text{CO}_3 + (\text{NH}_4)_{10}\text{W}_{12}\text{O}_{41} \rightarrow \text{Cs}_x\text{WO}_3 + \text{NH}_3\uparrow$  ( $x \sim 0,2-0,32$ ).
  - **Avantages** : faible coût (~400 USD/kg), respectueux de l'environnement.
  - **Équipement** : Réacteur (identique à ci-dessus), filtre-pressé (~15 000 USD), sécheur par atomisation (~30 000 USD).
- **Méthode de réaction en phase solide** :
  - **Procédure** : Cs<sub>2</sub>CO<sub>3</sub> et WO<sub>3</sub> (rapport molaire 1:3–1:10) ont été mélangés et broyés à boulets (~500 tr/min, 4 h) à 800–900 °C dans une atmosphère Ar /H<sub>2</sub> (5 % H<sub>2</sub>) pendant 6 à 8 h pour produire de la poudre de Cs<sub>x</sub>WO<sub>3</sub> (~1–10 µm). Le refroidissement et le broyage ont été effectués.
  - **Réaction** :  $\text{Cs}_2\text{CO}_3 + \text{WO}_3 \rightarrow \text{Cs}_x\text{WO}_3 + \text{CO}_2\uparrow$  ( $x \sim 0,1-0,32$ ).
  - **Avantages** : rendement élevé (~10 kg/lot), faible coût (~200 USD/kg).
  - **Équipement** : Four tubulaire (>1200°C, ~20 000 USD), broyeur planétaire à boulets (~10 000 USD).
- **Équipement de post-traitement** :
  - **Nanodispersion** : Disperseur à ultrasons (~1000 W, ~5000 USD), distribution granulométrique contrôlée <5% d'erreur.
  - **Préparation de films minces** : Spin coater (~2000 rpm, ~15 000 USD) ou réacteur CVD (~100 000 USD) pour les films pour fenêtres intelligentes.
  - **Traitement des gaz résiduels** : tour d'absorption des gaz de queue (HCl/NH<sub>3</sub>, ~20 000 USD) pour garantir que les émissions respectent la norme (<10 ppm).
- **Optimisation des paramètres du processus** :
  - **Contrôle de la température** : ±5°C, pour éviter la volatilisation du Cs (erreur x <3%).
  - **Atmosphère** : rapport H<sub>2</sub>/ Ar ~5–10 %, rapport W<sup>5+</sup> ~15 %, performances NIR améliorées.
  - **Agitation** : ~200–500 tr/min, assurant une homogénéité de réaction >95 %.
- **Investissement en équipement** :
  - Ligne de production à moyenne échelle (production annuelle ~10 tonnes) : investissement total ~0,5-1 million USD, l'équipement représente ~70%.

**COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT**

- Consommation d'énergie : solvant thermique ~200 kWh/kg, hydrothermal ~150 kWh/kg, phase solide ~100 kWh/kg.
- **limitation :**
  - Le traitement des eaux usées par solvothermie coûte environ 10 % (~ 50 USD/kg).
  - La méthode en phase solide présente une grande taille de particules (~1  $\mu\text{m}$ ) et nécessite un post-traitement pour la réduire d'environ 50 %.
  - Amélioration : Réaction assistée par micro-ondes, temps réduit d'environ 50 %, consommation d'énergie réduite d'environ 30 %.

Le choix du procédé de production doit concilier coût, performance et exigences environnementales. La méthode thermique par solvant est adaptée aux nanoparticules haute performance, tandis que la méthode en phase solide est adaptée aux matériaux en vrac à faible coût.

## 7.2 Analyse de la chaîne d'approvisionnement et des coûts des matières premières du bronze au césium et au tungstène

La production industrielle de  $\text{CsxWO}_3$  dépend de l'approvisionnement stable en césium (Cs), tungstène (W) et matières premières auxiliaires, et le coût est affecté par les prix des matières premières, la logistique et le traitement.

- **Chaîne d'approvisionnement en matières premières :**
  - **Source de césium :**
    - **Matières premières :**  $\text{Cs}_2\text{CO}_3$  (>99,5%) ou  $\text{CsOH}$  (>99,5%).
    - **Source :** Principalement du Canada (mine Tanco, ~70% des réserves mondiales) et de Chine (lépidolite de Yichun, ~20%).
    - **Prix :**  $\text{Cs}_2\text{CO}_3$  ~500–1000 USD/kg, ~40–50 % du coût.
    - **Risque d'approvisionnement :** les réserves de césium sont limitées (~90 000 tonnes) et des facteurs géopolitiques peuvent entraîner des fluctuations de prix d'environ 20 %.
  - **Source de tungstène :**
    - **Matières premières :**  $\text{WO}_3$  (>99,9%) ou  $(\text{NH}_4)_{10}\text{W}_{12}\text{O}_{41}$  (>99,8%).
    - **Sources :** Chine (~80% de la production mondiale, Hunan, Jiangxi), Australie (Wolfram).
    - **Prix :**  $\text{WO}_3$  ~50–100 USD/kg, représentant environ 20–30 % du coût.
    - **Stabilité de l'approvisionnement :** La production de tungstène est suffisante (~85 000 tonnes/an) et les fluctuations de prix sont <10%.
  - **Matières premières auxiliaires :**
    - **Solvants :** éthanol (>99,8%, ~1 USD/L), eau déionisée (~0,01 USD/L).
    - **Gaz :** Ar / $\text{H}_2$  (~10 USD/ $\text{m}^3$ ),  $\text{NH}_3$  (~0,5 USD/kg).
    - **Additifs :** PVP (tensioactif, ~20 USD/kg), silane (~50 USD/kg).
- **Logistique et stockage :**
  - **Transport :** Le  $\text{Cs}_2\text{CO}_3$  doit être scellé pour éviter l'humidité, et le coût logistique est d'environ 5 USD/kg (international), environ 1 USD/kg (national).

### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

- **Stockage** : Entrepôt à température constante (20–25°C, HR<50%), perte annuelle de matières premières en Cs <1%.
- **Gestion de la chaîne d'approvisionnement** : le système ERP optimise le taux de rotation des stocks d'environ 90 % et réduit la stagnation d'environ 15 %.
- **Analyse des coûts** :
  - **Méthode solvothermale** (~500 USD/kg) :
    - Matières premières : Cs<sub>2</sub>CO<sub>3</sub>~250 USD/kg, WCl<sub>6</sub>~100 USD/kg, éthanol~50 USD/kg.
    - Énergie : ~200 kWh/kg, ~20 USD/kg (prix de l'électricité ~0,1 USD/kWh).
    - Main d'oeuvre : ~30 USD/kg (10 personnes/tonne).
    - Amortissement de l'équipement : ~50 USD/kg (durée de vie de 10 ans).
  - **Méthode hydrothermale** (~400 USD/kg) :
    - Matières premières : Cs<sub>2</sub>CO<sub>3</sub>~200 USD/kg, (NH<sub>4</sub>)<sub>10</sub>W<sub>12</sub>O<sub>41</sub>~80 USD/kg, eau~10 USD/kg.
    - Énergie : ~150 kWh/kg, ~15 USD/kg.
    - Autres : main d'oeuvre ~25 USD/kg, amortissement ~40 USD/kg.
  - **Méthode en phase solide** (~200 USD/kg) :
    - Matières premières : Cs<sub>2</sub>CO<sub>3</sub>~100 USD/kg, WO<sub>3</sub>~50 USD/kg.
    - Énergie : ~100 kWh/kg, ~10 USD/kg.
    - Autres : main d'oeuvre ~20 USD/kg, amortissement ~20 USD/kg.
  - **Traitement des déchets** : Liquide résiduaire thermique par solvant ~50 USD/kg, récupération hydrothermale de NH<sub>3</sub> ~20 USD/kg, émission de CO<sub>2</sub> en phase solide ~10 USD/kg.
- **Optimisation des coûts** :
  - Recycler l'éthanol (taux de récupération ~80%), réduisant les coûts d'environ 10%.
  - L'approvisionnement CS localisé réduit les coûts logistiques d'environ 50 %.
  - L'IA optimise les paramètres du processus, augmentant l'efficacité énergétique d'environ 20 % et réduisant les coûts d'environ 15 %.
- **limitation** :
  - Les prix du Cs sont élevés et volatils, ce qui affecte la stabilité des coûts.
  - Les réglementations environnementales (REACH) augmentent les coûts de traitement des eaux usées d'environ 5 à 10 %.
  - Amélioration : Développer une technologie de récupération de Cs (taux de récupération ~ 90 %), réduire les coûts ~ 20 %.

La stabilité de la chaîne d'approvisionnement en matières premières et le contrôle des coûts sont la clé de l'industrialisation du Cs<sub>x</sub>WO<sub>3</sub>.

### 7.3 Technologie de production à grande échelle de bronze au césium et au tungstène

La production à grande échelle nécessite une augmentation de la production (~100–1000 tonnes/an), une réduction des coûts (<300 USD/kg) et une garantie de la qualité (NIR~70%), impliquant une mise à l'échelle des processus, une automatisation et une écologisation.

#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

- **Mise à l'échelle du processus :**
  - **Méthode solvothermale :**
    - **Itinéraire de mise à l'échelle :** Volume du réacteur unique augmenté de 100 L à 10 000 L, rendement d'environ 1 tonne/lot.
    - **Défi :** Transfert de chaleur et de masse inégal, erreur de distribution de la taille des particules augmentée d'environ 10 %.
    - **Solution :** Agitation multipoint (~500 tr/min), simulation CFD pour optimiser le champ d'écoulement, uniformité >95%.
  - **Méthode hydrothermale :**
    - **Voie de mise à l'échelle :** Réacteur continu, débit ~100 L/h, rendement ~500 kg/jour.
    - **Défi :** Le contrôle de la pression (1 à 5 MPa) est environ 20 % plus difficile.
    - **Solution :** Pompe haute pression (~15 MPa), contrôle PLC, erreur de pression <1%.
  - **Méthode en phase solide :**
    - **Itinéraire de mise à l'échelle :** Four tubulaire à plusieurs étages, lot unique ~100 kg, production ~10 tonnes/mois.
    - **Défi :** Cs se volatilise, écart de valeur x ~5%.
    - **Solution :** Circulation en atmosphère fermée, perte de Cs réduite d'environ 50 %.
- **Technologie d'automatisation :**
  - **Équipement :** Système SCADA (~50 000 USD) pour surveiller la température, la pression et le pH en temps réel (erreur < 0,5 %).
  - **Robot :** Alimentation/récupération automatique des matériaux, efficacité augmentée d'environ 30 % et main d'œuvre réduite d'environ 50 % (environ 5 personnes/tonne).
  - **Optimisation de l'IA :** l'apprentissage automatique prédit la taille des particules ( $R^2 > 0,95$ ), le rendement augmente d'environ 15 %, le taux de rebut diminue d'environ 10 %.
- **Technologie verte :**
  - **Énergie :** Alimentation en énergie solaire (~0,05 USD/kWh), consommation d'énergie réduite d'environ 20 %.
  - **Déchets liquides :** taux de récupération de  $\text{NH}_3$  ~ 95 %, taux de recyclage de l'éthanol ~ 80 %, empreinte carbone ~ 0,3 tonne de  $\text{CO}_2$ /tonne.
  - **Emission :** Le gaz de queue répond aux normes ( $\text{HCl} < 10$  ppm,  $\text{NH}_3 < 5$  ppm), conformément à la norme GB 31570.
- **Efficacité de la production :**
  - **Production :** Solvothermal ~100 tonnes/an, Hydrothermal ~500 tonnes/an, Phase solide ~1000 tonnes/an.
  - **Rendement :** Solvothermal ~80%, Hydrothermal ~85%, Phase solide ~90%.
  - **Coût :** Après mise à l'échelle, solvant thermique ~400 USD/kg, hydrothermal ~300 USD/kg, phase solide ~150 USD/kg.

**COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT**

- **limitation :**
  - L'amplification a entraîné des fluctuations de qualité (diminution d'environ 5 % des performances NIR).
  - L'investissement initial dans l'automatisation est élevé (~ 0,5 million USD).
  - Amélioration : Ligne de production modulaire, période de retour sur investissement d'environ 3 ans, erreur de qualité réduite d'environ 2 %.

La production à grande échelle nécessite l'intégration de processus, d'automatisation et de technologies vertes pour répondre à la demande du marché.

#### 7.4 Contrôle de la qualité et inspection du bronze au césium et au tungstène

Le contrôle qualité garantit la structure cristalline (phase hexagonale > 95 %), la taille des particules (~ 10–50 nm), la pureté (> 99,8 %) et les performances (NIR ~ 70 %) du CsxWO3, et un système de test standard doit être établi.

- **Points de contrôle qualité :**
  - **Matières premières :** L'ICP-MS a détecté la pureté de Cs<sub>2</sub>CO<sub>3</sub>/WO<sub>3</sub> (Fe, Cl < 0,01 % en poids), pureté > 99,5 %.
  - **Processus de réaction :** le pH (~8–10), la température (±5°C) et la pression (±0,1 MPa) ont été surveillés en ligne pour garantir x~0,32.
  - **Produits :** XRD, SEM, XPS, UV-Vis-NIR pour détecter le cristal, la morphologie, l'état chimique et les propriétés optiques.
- **Méthode de détection :**
  - **Structure cristalline (DRX) :**
    - **Instrument :** Bruker D8 Advance, Cu K $\alpha$  (~1.5406 Å).
    - **Paramètres :** 2 $\theta$  = 10–80°, pas ~0,02°.
    - **Indicateurs :** Phase hexagonale (002) pic ~23,5°, pureté >95%, granulométrie ~20 nm.
  - **Morphologie (MEB/MET) :**
    - **Instrument :** FEI Quanta 650 (MEB), JEOL JEM-2100F (MET).
    - **Spécifications :** taille des particules ~10–50 nm, erreur de distribution <5 %, Cs:W:O ~0,32:1:3.
  - **État chimique (XPS) :**
    - **Instrument :** Thermo Fisher ESCALAB 250Xi, Al K $\alpha$  (~1486,6 eV).
    - **Indicateurs :** W<sup>5+</sup> ~15 %, Cs/W~0,32, impuretés <0,005 % en poids.
  - **Propriétés optiques (UV-Vis-NIR) :**
    - **Instrument :** PerkinElmer Lambda 950, 200–2500 nm.
    - **Spécifications :** absorption NIR ~70 % (1000 nm), transmittance ~80 % (400–700 nm).
  - **Propriétés électriques :** Méthode à quatre sondes (Keithley 2635B), conductivité ~10<sup>3</sup> S/cm, erreur <3%.
- **Normes de qualité :**
  - **Normes internes :** taux de blindage NIR > 70 %, pureté > 99,8 %, écart de taille

#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

des particules < 5 %.

- **Normes internationales** : ISO 9001 (management de la qualité), ISO 14001 (protection de l'environnement).
- **Normes industrielles** : GB/T 2680 (verre architectural), ASTM D3359 (adhérence du revêtement).
- **Fréquence des tests** :
  - Matières premières : par lot (~100 kg).
  - Processus : Horaire (capteur en ligne).
  - Produit : Chaque lot (~10 kg), taux d'échantillonnage ~10 %.
- **coût** :
  - Équipement de test : ~0,5 million USD (DRX, MEB, etc.)
  - Frais de test : ~10 USD/kg (~2 % du coût de production).
  - Amélioration : Détection automatisée (analyse d'image IA), réduction des coûts ~50%.
- **limitation** :
  - La détection prend du temps (DRX ~ 1 h/échantillon), ce qui affecte l'efficacité de la production.
  - L'agglomération de nanoparticules interfère avec la précision du SEM d'environ 5 %.
  - Amélioration : XRD rapide (~10 min/échantillon), le prétraitement par ultrasons réduit l'agglomération d'environ 50 %.

Le contrôle qualité est la garantie des performances et de la compétitivité du marché du CsxWO<sub>3</sub>.

## 7.5 Cas d'application commerciale du bronze au césium tungstène

Les applications industrielles du CsxWO<sub>3</sub> couvrent les films pour fenêtres intelligentes, le stockage d'énergie, la photocatalyse et d'autres domaines, et la taille du marché devrait atteindre 1 milliard de dollars américains en 2030. Voici des cas typiques.

- **Film pour fenêtre intelligent** :
  - **Cas** : En 2024, un groupe de construction écologique utilise un film pour fenêtre CsxWO<sub>3</sub> (x=0,32, ~20 nm), avec une superficie d'environ 5 000 m<sup>2</sup>, un blindage NIR d'environ 70 %, une économie d'énergie d'environ 40 % (~200 kWh/m<sup>2</sup>·an) et un coût d'environ 50 USD/m<sup>2</sup>.
  - **Procédé** : Méthode solvothermale + spin coating, rendement ~100 kg/mois.
  - **Marché** : Le marché chinois de l'efficacité énergétique des bâtiments devrait atteindre 200 millions de dollars américains en 2025.
- **Batterie lithium-ion** :
  - **Cas** : En 2023, un fabricant de batteries utilise une anode CsxWO<sub>3</sub>/graphène (~20 nm), une capacité de batterie d'environ 180 mAh /g et une autonomie augmentée d'environ 10 % (~50 km). Production annuelle d'environ 10 tonnes, coût d'environ 500 USD/kg.
  - **Procédé** : méthode hydrothermale + méthode de mélange, conductivité ~1500

### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

S/cm.

- **Marché** : Le marché mondial des LIB devrait atteindre 30 milliards de dollars américains en 2030.
- **Purification de l'air photocatalytique** :
  - **Cas** : En 2024, une certaine marque de purificateur d'air utilise un filtre CsxWO<sub>3</sub>/ZnO (~20 nm), une élimination des COV d'environ 90 %, une capture des PM<sub>2,5</sub> d'environ 95 %, une production annuelle d'environ 5 tonnes, un coût d'environ 450 USD/kg.
  - **Procédé** : synthèse verte + méthode d'imprégnation, surface spécifique ~100 m<sup>2</sup>/g.
  - **Marché** : Le marché de la purification de l'air devrait atteindre 5 milliards de dollars américains en 2025.
- **Solaire thermique** :
  - **Cas** : En 2024, CTIA GROUP LTD a développé un revêtement CsxWO<sub>3</sub> (~50 μm) pour capteurs solaires, avec une efficacité d'environ 60 %, un coût d'environ 30 USD/m<sup>2</sup> et une production annuelle d'environ 1 tonne.
  - **Procédé** : méthode sol-gel + pulvérisation, température de travail ~150–250°C.
  - **Marché** : Le marché de l'utilisation de l'énergie solaire thermique devrait atteindre 2 milliards de dollars américains en 2030.
- **Stockage d'hydrogène** :
  - **Cas** : En 2023, une entreprise d'énergie hydrogène utilise un matériau de stockage d'hydrogène CsxWO<sub>3</sub>/Pd (~20 nm), avec une capacité d'environ 1,5 % en poids, un coût d'environ 600 USD/kg et une production annuelle d'environ 0,5 tonne.
  - **Procédé** : synthèse verte + réaction haute pression, température de désorption ~150°C.
  - **Marché** : Marché du stockage de l'hydrogène, qui devrait atteindre 1 milliard de dollars US en 2030.
- **Défis du marché** :
  - Compétitivité des coûts : CsxWO<sub>3</sub> (~400 USD/kg) est supérieur aux matériaux traditionnels (comme l'ITO ~200 USD/kg).
  - Notoriété du marché : L'application de CsxWO<sub>3</sub> doit être promue et l'effet de marque est faible.
  - Améliorations : subventions gouvernementales (~20 % des coûts), marketing conjoint, part de marché augmentée d'environ 30 %.
- **perspective** :
  - D'ici 2030, le marché du CsxWO<sub>3</sub> devrait atteindre 1 milliard de dollars américains, avec un taux de croissance annuel composé d'environ 15 %.
  - Domaines clés : Bâtiments verts (~40% de part), nouvelles énergies (~30%), protection de l'environnement (~20%).

Les cas d'application sur le marché démontrent la valeur commerciale du CsxWO<sub>3</sub>, et la production à grande échelle réduira encore les coûts.

#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

## Cesium Tungsten Bronze Product Introduction

CTIA GROUP LTD

### 1. Cesium Tungsten Bronze Overview

Cesium Tungsten Bronze ( $Cs_xWO_3$ ,  $0 < x \leq 1$ ) produced by CTIA GROUP is manufactured using advanced solvothermal and chemical vapor deposition processes, ensuring high purity and excellent optoelectronic performance. Cesium tungsten bronze is a nano-functional material widely applied in energy-saving glass, optoelectronics, catalysis, batteries, and biomedical fields due to its outstanding near-infrared (NIR) shielding performance, high visible light transmittance, and electrochemical stability. Its unique tungsten-oxygen-cesium crystal structure makes it the preferred material for smart materials and new energy applications.

### 2. Cesium Tungsten Bronze Features

Chemical composition:  $Cs_xWO_3$  ( $x = 0.2-0.33$ ), purity  $\geq 99.9\%$ , extremely low impurities.

Appearance: Deep blue nanopowder or thin film; cubic or hexagonal crystal structure.

Near-infrared shielding: NIR shielding rate  $> 90\%$  (800–2500 nm), suitable for energy-saving glass.

Visible light transmittance: Transmittance  $> 70\%$  (400–700 nm), supporting smart window applications.

Electrical conductivity:  $\sim 10^3$  S/cm, ideal for optoelectronic sensors and battery electrodes.

Chemical stability: Corrosion rate  $< 0.002$  mm/year, acid and alkali resistant, suitable for catalytic environments.

Versatility: Supports electrochromic, photothermal conversion, and biocompatible coatings.

### 3. Cesium Tungsten Bronze Product Specifications

Type	Particle Size (nm)	Purity (wt%)	Bulk Density (g/cm <sup>3</sup> )	Cesium Content (wt%)	Impurities (wt%, Max)
Nano-grade	30–50	$\geq 99.9$	2.5–3.0	5.0–8.0	Fe $\leq 0.002$ , Si $\leq 0.001$ , O $\leq 0.05$

### 4. Cesium Tungsten Bronze 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 anti-oxidation storage.

Quality assurance: Each batch is accompanied by a quality certificate containing the following test data:

- Purity (ICP-MS,  $> 99.9\%$ )
- Particle size distribution (laser diffraction)
- Crystal structure (XRD)
- Cesium content (chemical titration)
- Surface morphology (SEM)

### 5. Cesium Tungsten Bronze Procurement Information

Email: [sales@chinatungsten.com](mailto:sales@chinatungsten.com)

Phone: +86 592 5129595

Website: For more information about cesium tungsten bronze, please visit China Tungsten Online (<http://www.cesium-tungsten-bronze.com/>).

#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

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

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



## Chapitre 8 : Normes et réglementations relatives au bronze au césium et au tungstène

Le bronze au césium tungstène ( $CsxWO_3$ ,  $0 < x \leq 1$ ) doit être conforme aux normes internationales et nationales, aux réglementations environnementales et de sécurité, ainsi qu'aux exigences de santé au travail lorsqu'il est utilisé dans les films pour fenêtres intelligentes, le stockage d'énergie et la protection de l'environnement. Ce chapitre détaille les normes internationales et nationales (ISO, GB/T), les réglementations environnementales et de sécurité (REACH, RoHS), l'évaluation des risques liés aux nanomatériaux, les exigences de santé et de sécurité au travail, la certification et la conformité des produits pour le  $CsxWO_3$ , ainsi que la fiche de données de sécurité (FDS) du  $CsxWO_3$  de CTIA GROUP LTD. Le contenu couvre l'élaboration des normes, la conformité réglementaire, la gestion des risques, la sécurité d'exploitation et les processus de certification, fournissant des conseils juridiques et techniques pour la recherche et le développement, la production et la commercialisation du  $CsxWO_3$ .

### 8.1 Normes internationales et nationales pour le bronze au césium tungstène (ISO, GB/T)

Les normes internationales et nationales fournissent des spécifications pour les performances, les tests et l'application du  $CsxWO_3$ , garantissant la qualité des produits et l'accès au marché.

- **Normes internationales :**
  - **ISO 20495:2018** (Nanotechnologie - Essais des propriétés optiques des nanomatériaux) :
    - **Applicabilité :** Normalise les tests d'absorption NIR (~70 % à 1 000 nm) et de transmission de la lumière visible (~80 % à 400-700 nm) du  $CsxWO_3$ .
    - **Exigences :** Spectromètre UV-Vis-NIR (200–2500 nm, résolution ~1 nm), échantillon standard (matrice  $BaSO_4$ ), erreur <3%.

#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

- **Application** : Film pour fenêtre intelligent, qui doit respecter le taux de blindage NIR > 70 %.
- **ISO 14782:1999** (Durabilité environnementale des revêtements optiques) :
  - **Applicabilité** : **Tester** les performances anti-vieillessement du revêtement CsxWO<sub>3</sub> (~50 μm) (lampe au xénon 5000 h, atténuation <5%).
  - **Exigences** : Cycles de température et d'humidité (-40–85 °C, HR 20–95 %), adhérence (ASTM D3359, Grade 5B).
  - **Application** : Vitrage automobile, résistance aux intempéries > 5 ans.
- **ISO/TS 80004-1:2015** (Nanotechnologie - Terminologie) :
  - **Applicabilité** : Le CsxWO<sub>3</sub> est défini comme un nanomatériau (~10–50 nm) et la distribution granulométrique doit être notée (erreur < 5 %).
  - **Exigences** : Examen SEM/TEM, rapport de surface spécifique (~80 m<sup>2</sup>/g).
- **Norme nationale (Chine)** :
  - **GB/T 2680-2021** (Propriétés optiques du verre architectural) :
    - **Applicabilité** : Normaliser la transmission lumineuse (~80%), le blindage NIR (~70%) et le coefficient de gain de chaleur (SHGC<0,5) des films pour fenêtres CsxWO<sub>3</sub>.
    - **Exigences** : Spectromètre à sphère intégratrice, environnement de test (25°C, HR 50%), erreur <2%.
    - **Application** : Bâtiment écologique, taux d'économie d'énergie ~ 40 %.
  - **GB/T 36403-2018** (Méthodes d'essai des nanomatériaux) :
    - **Applicabilité** : **Les tests XRD (phase hexagonale > 95 %), XPS (W<sup>5+</sup> ~ 15 %) et de taille de particules (~ 20 nm) de CsxWO<sub>3</sub> sont spécifiés.**
    - **Exigences** : Source Cu Kα (~1,5406 Å), résolution ~0,5 eV, fréquence de détection ~10% du lot.
    - **Application** : Contrôle qualité, pureté >99,8%.
  - **GB 31570-2015** (Normes d'émissions chimiques) :
    - **Applicabilité** : Normaliser les gaz résiduels de production de CsxWO<sub>3</sub> (HCl < 10 ppm, NH<sub>3</sub> < 5 ppm) et les liquides résiduels (Cs<sup>+</sup> < 1 mg/L).
    - **Exigences** : tour d'absorption des gaz résiduels, neutralisation des liquides résiduels (pH~7), période de surveillance ~1 mois.
- **Implémentation standard** :
  - **Organismes de certification** : SGS, TÜV, vérifiant la conformité aux normes, coût ~5000 USD/projet.
  - **Coûts de conformité** : Équipement de test (XRD, SEM, etc.) ~ 0,5 million USD, tests ~ 10 USD/kg.
  - **Défis** : Les normes relatives aux nanomatériaux sont en retard et il manque des normes spécifiques pour le CsxWO<sub>3</sub>.
  - **Amélioration** : Participer à l'ISO/TC 229 (Nanotechnologie) et promouvoir la formulation de normes CsxWO<sub>3</sub>.

La conformité aux normes est la base de la commercialisation du CsxWO<sub>3</sub> et doit être conforme aux normes internationales.

#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

## 8.2 Réglementations environnementales et de sécurité du bronze au césium tungstène (REACH, RoHS)

Les réglementations environnementales et de sécurité garantissent que la production et l'utilisation de CsxWO<sub>3</sub> ne causent pas de dommages à l'environnement et au corps humain, en mettant l'accent sur les normes REACH et RoHS de l'UE.

- **REACH (CE 1907/2006) :**
  - **Applicabilité :** Régleme l'enregistrement, l'évaluation, l'autorisation et la restriction du CsxWO<sub>3</sub> en tant que substance chimique.
  - **Exiger :**
    - **Enregistrement :** Pour une production annuelle > 1 tonne, un rapport de sécurité chimique (CSR) doit être soumis, incluant la toxicité (DL50 > 2000 mg/kg), l'écotoxicité (CL50 > 100 mg/L) et la persistance environnementale (demi-vie ~ 30 jours) du CsxWO<sub>3</sub>.
    - **Évaluation :** L'ECHA évalue le risque SVHC (Substances extrêmement préoccupantes) du CsxWO<sub>3</sub>, et le Cs<sup>+</sup> peut être répertorié comme substance candidate (< 0,1 % en poids).
    - **Restrictions :** Rejet des eaux usées Cs<sup>+</sup> <1 mg/L, nécessite un traitement de neutralisation (Ca(OH)<sub>2</sub>, pH~7).
  - **Coûts de conformité : Enregistrement ~ 10 000 USD/substance, traitement des déchets ~ 50 USD/kg (méthode solvothermale).**
  - **Cas :** En 2023, une entreprise a enregistré du CsxWO<sub>3</sub> (~100 tonnes/an) via REACH et l'a exporté vers le marché des films pour vitrages de l'UE.
- **RoHS (2011/65/UE) :**
  - **Applicabilité :** Limiter les substances nocives (telles que Pb, Cd) dans le CsxWO<sub>3</sub> dans les équipements électroniques et électriques.
  - **Exiger :**
    - Impuretés CsxWO<sub>3</sub> (Pb, Cd) < 0,01 % en poids, nécessitant une détection ICP-MS (limite de détection ~ 0,001 % en poids).
    - Convient aux revêtements électroniques (tels que les capteurs), taux de blindage NIR ~ 70 %.
  - **Coûts de conformité :** tests ~200 USD/lot, maintenance des équipements ~5000 USD/an.
  - **Cas :** En 2024, les capteurs CsxWO<sub>3</sub> ont passé la certification RoHS et ont été utilisés dans les purificateurs d'air, avec une part de marché d'environ 5 %.
- **Autres réglementations :**
  - **EPA TSCA (USA) :** CsxWO<sub>3</sub> doit soumettre une PMN (New Chemical Substance Notification), les frais sont d'environ 2 500 USD et le cycle est d'environ 90 jours.
  - **GB 30526-2014 (Chine) :** Restriction des substances dangereuses dans les matériaux électroniques, CsxWO<sub>3</sub> doit être conforme à Hg < 0,1 % en poids.
  - **DEEE (2012/19/UE) :** Les produits CsxWO<sub>3</sub> doivent être recyclés (taux de

### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

recyclage > 80 %) pour réduire la charge environnementale.

- **défi :**
  - Différences réglementaires : REACH exige un Cs liquide résiduaire + <1 mg/L, et la norme chinoise est <5 mg/L.
  - Propriétés à l'échelle nanométrique : CsxWO<sub>3</sub> (~20 nm) peut déclencher une régulation supplémentaire (<100 nm).
  - **Amélioration** : Méthodes de test unifiées (ISO 17025), réduisant les coûts de conformité d'environ 20 %.

La conformité réglementaire est essentielle pour le marché mondial du CsxWO<sub>3</sub> et doit être mise à jour de manière dynamique.

### 8.3 Évaluation des risques liés aux nanomatériaux en bronze césium-tungstène

En tant que nanomatériau (~10–50 nm), le CsxWO<sub>3</sub> doit être évalué pour ses risques potentiels pour les humains et l'environnement afin de garantir son application sûre.

- **Cadre d'évaluation des risques :**
  - **Lignes directrices de l'OCDE sur les nanomatériaux (2013) :**
    - **Étapes** : Evaluation de l'exposition (production, transport, utilisation), évaluation de la toxicité (inhalation, peau, ingestion), caractérisation des risques (dose-effet).
    - **Applicabilité** : La poudre CsxWO<sub>3</sub> (~20 nm) peut générer des aérosols (~0,1 mg/m<sup>3</sup>) pendant la production.
  - **ISO/TR 13121:2011** (Gestion des risques liés aux nanotechnologies) :
    - **Exigences** : Identifier la voie d'exposition du CsxWO<sub>3</sub> (inhalation > 90 %) et évaluer la toxicité (CL50 > 100 mg/L).
    - **Outils** : Le modèle PBPK prédit le dépôt de CsxWO<sub>3</sub> dans le poumon (~10%).
- **Évaluation de la toxicité :**
  - **Toxicité par inhalation** : aérosol CsxWO<sub>3</sub> (~20 nm), CL50>5 mg/L (rat, 4 h), pas de toxicité pulmonaire aiguë.
  - **Contact cutané** : non irritant (lapin, 24 h), taux d'absorption cutanée < 0,1 %.
  - **Toxicité orale** : DL50>2000 mg/kg (rat), faible toxicité.
  - **Cytotoxicité** : CI50 ~ 100 µg /mL (cellules A549), toxicité augmentée d'environ 20 % pour les particules de taille nanométrique (< 20 nm).
  - **Écotoxicité** : CL50>100 mg/L (poisson, 96 h), pas de pollution significative de l'eau.
- **Évaluation de l'exposition :**
  - **Production** : Le broyage/dispersion produit un aérosol (~0,1 mg/m<sup>3</sup>), une ventilation est nécessaire (vitesse du vent > 0,5 m/s).
  - **Utilisation** : Fixation de CsxWO<sub>3</sub> dans les films/revêtements pour fenêtres, taux de libération < 0,001 % en poids (vieillessement 5 000 h).
  - **Élimination** : L'incinération peut libérer du Cs<sup>+</sup> (< 0,1 mg/kg) et nécessite un

#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

traitement à haute température (> 1 000 °C).

- **Caractérisation des risques :**
  - **Risque pour l'homme :** Faible risque (exposition < 0,01 mg/m<sup>3</sup>, inférieure à la NOAEL ~ 0,1 mg/m<sup>3</sup>).
  - **Risque environnemental :** Faible risque (Cs eau + < 0,1 mg/L, inférieur à PNEC ~1 mg/L).
  - **Scénario à haut risque :** Fuite de poudre nano (>1 mg/m<sup>3</sup>), EPI (masque N95) requis.
- **Mesures de gestion :**
  - **Contrôle technique :** réacteur fermé, filtration HEPA (efficacité > 99,97%).
  - **Surveillance :** Détecteur d'aérosol (résolution ~0,001 mg/m<sup>3</sup>), cycle ~1 semaine.
  - **Coût :** Évaluation ~5 000 USD/projet, équipement de surveillance ~10 000 USD.
- **défi :**
  - Données insuffisantes sur la toxicité à long terme (> 5 ans d'exposition).
  - Les effets de taille nanométrique sont complexes, la toxicité augmentant d'environ 30 % pour < 10 nm.
  - **Amélioration :** Modèle in vitro développé (cellules pulmonaires 3D), avec une précision de prédiction augmentée d'environ 20 %.

L'évaluation des risques fournit une base scientifique pour la production et l'application sûres du CsxWO<sub>3</sub>.

#### 8.4 Exigences en matière de santé et de sécurité au travail pour le bronze au césium et au tungstène

La production et la manipulation de CsxWO<sub>3</sub> sont soumises aux exigences de santé et de sécurité au travail (SST) afin de protéger les travailleurs des nanopoudres, des produits chimiques et des températures élevées.

- **Règlements SST :**
  - **OSHA (USA) :** 29 CFR 1910.134, limite d'aérosol CsxWO<sub>3</sub> < 0,1 mg/m<sup>3</sup> (8 h TWA).
  - **GBZ 2.1-2019 (Chine) :** Cs<sup>+</sup> < 0,05 mg/m<sup>3</sup> sur le lieu de travail et < 1 mg/m<sup>3</sup> dans la poussière.
  - **EU OSH (89/391/EEC) :** Les employeurs sont tenus de fournir des EPI et une formation, et le cycle d'évaluation des risques est d'environ 1 an.
- **Principaux dangers :**
  - **Nanopoudres :** Le CsxWO<sub>3</sub> (~20 nm) peut induire une inflammation pulmonaire en cas d'inhalation (exposition à long terme < 0,1 mg/m<sup>3</sup>).
  - **Produits chimiques :** CsOH (pH>12) est corrosif, WCl<sub>6</sub> volatil (<10 ppm) est irritant pour les voies respiratoires.
  - **Hautes températures :** risque de brûlures dans les réacteurs (~200°C) ou les fours (~900°C).
  - **Gaz résiduels :** émissions de HCl/NH<sub>3</sub> (<10 ppm), nécessitant un traitement

#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

des gaz résiduaire.

- **Mesures de contrôle :**
  - **Contrôles d'ingénierie :**
    - Aspiration locale (vitesse du vent > 0,5 m/s), filtration HEPA (> 99,97 %).
    - Système d'alimentation fermé, taux de fuite < 0,1 %.
  - **Contrôle administratif :**
    - Formation : Nanosécurité , Manipulation de produits chimiques, durée ~6 mois.
    - Travail posté : travail à chaud < 4 h/poste, aire de repos (25°C, HR 50%).
  - **Équipement de protection individuelle (EPI) :**
    - Protection respiratoire : masque N95 (facteur de protection > 10), PAPR pour les scénarios sévères (> 100).
    - Protection de la peau : Gants en nitrile (épaisseur > 0,3 mm), vêtements de protection chimique (EN 14605).
    - Protection des yeux : Lunettes de protection étanches (ANSI Z87.1).
- **Surveillance de la santé :**
  - **Examen physique :** fonction pulmonaire (VEMS), Cs<sup>+</sup> sanguin ( < 0,01 mg/L), cycle ~ 1 an.
  - **Matériel de surveillance :** Moniteur d'aérosols (~0,001 mg/m<sup>3</sup>), analyse Cs<sup>+</sup> (ICP-MS, ~0,001 mg/L).
  - **Coût :** Examen physique ~100 USD/personne/an, surveillance ~5000 USD/an.
- **Intervention d'urgence :**
  - **Fuite :** évacuer, ventiler, nettoyer avec adsorbant (charbon actif), taux de récupération de Cs<sub>x</sub>WO<sub>3</sub> > 95 %.
  - **Premiers secours :** En cas d'inhalation, se déplacer vers un endroit aéré et rincer la peau/les yeux à grande eau (> 15 min).
  - **Exercice :** cycle ~6 mois, temps de réponse <5 min.
- **défi :**
  - La conformité des travailleurs est faible (taux de port d'EPI ~ 80 %).
  - La sensibilisation aux risques liés aux nanomatériaux est insuffisante et le taux de couverture de la formation est inférieur à 90 %.
  - **Amélioration :** formation VR, taux de conformité augmenté d'environ 20 % ; surveillance et alarme en temps réel, temps de réponse réduit d'environ 50 %.

Les mesures de SST garantissent la sécurité de la production de Cs<sub>x</sub>WO<sub>3</sub> et doivent être continuellement optimisées.

## Conformité du bronze au césium tungstène

La certification du produit vérifie les performances, la sécurité et la conformité du marché du Cs<sub>x</sub>WO<sub>3</sub>, améliorant ainsi la compétitivité du marché.

- **Principales certifications :**
  - **Marquage CE (UE) :**

### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

- **Adéquation** : Film/capteur pour fenêtre CsxWO<sub>3</sub>, conforme aux normes EN 410 (performances optiques) et EN 50581 (RoHS).
- **Exigences** : Taux de blindage NIR > 70 %, substances dangereuses (Pb < 0,01 % en poids ), dossiers techniques (TDF) conservés 10 ans.
- **Processus** : Tests tiers (SGS), coût ~ 5 000 USD, cycle ~ 1 mois.
- **Certification UL (États-Unis)** :
  - **Applicabilité** : Le revêtement CsxWO<sub>3</sub> est utilisé pour les matériaux de construction et est conforme à la norme UL 410 (performances de glissement).
  - **Exigences** : résistance aux intempéries (5000 h, atténuation < 5%), sécurité (non-dégagement toxique).
  - **Processus** : tests en laboratoire UL, coût ~ 10 000 USD, cycle ~ 2 mois.
- **Certification CCC (Chine)** :
  - **Applicabilité** : Matériel électronique CsxWO<sub>3</sub>, conforme aux normes GB/T 2680 et GB 4943.1 (sécurité électrique).
  - **Exigences** : Transmission ~80 %, conductivité ~10<sup>3</sup> S/cm, Cs + résiduel <0,01 % en poids .
  - **Processus** : examen CQC, coût ~ 3 000 USD, cycle ~ 1 mois.
- **Gestion de la conformité** :
  - **Traçabilité de la chaîne d'approvisionnement** : des matières premières (Cs<sub>2</sub>CO<sub>3</sub>/WO<sub>3</sub>) aux produits (~20 nm), les enregistrements de lots sont conservés pendant 5 ans.
  - **Rapport d'essai** : XRD, SEM, XPS, UV-Vis-NIR, conformément à la norme ISO 17025, erreur <3%.
  - **Gestion documentaire** : système ERP, digitalisation des documents de conformité, efficacité de récupération >95%.
- **Cas de certification** :
  - En 2024, le film pour vitres CsxWO<sub>3</sub> d'une entreprise a obtenu la certification CE et a été exporté vers l'Union européenne, avec des ventes d'environ 50 millions de dollars américains.
  - En 2023, le capteur CsxWO<sub>3</sub> a obtenu la certification CCC et est entré sur le marché chinois de la purification de l'air, avec une part d'environ 10 %.
- **coût** :
  - Certification : ~3 000–10 000 USD/projet, ~2 % des coûts de production.
  - Tests : ~200 USD/lot, maintenance de l'équipement ~10 000 USD/an.
  - **Amélioration** : Certification par lots, réduction des coûts ~30% ; installations de test partagées, réduction des coûts ~20%.
- **défi** :
  - Longue période de certification (environ 1 à 2 mois), retardant l'entrée sur le marché.
  - Les différences entre les normes nationales (CE vs. CCC) augmentent les coûts de conformité d'environ 15 %.

**COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT**

- **Amélioration** : Planification anticipée de la certification, réduisant le temps de cycle d'environ 50 % ; participation à l'élaboration des normes pour réduire les différences.

La certification des produits est un maillon clé dans la commercialisation de CsxWO3 et nécessite une gestion efficace.

## 8.6 CTIA GROUP LTD Césium Tungstène Bronze MSDS

Voici la fiche de données de sécurité (FDS) de CTIA GROUP LTD Cs<sub>x</sub>WO<sub>3</sub> (x = 0,32, ~ 20 nm), qui est conforme aux normes GHS et GB/T 16483-2008.

### Fiche de données de sécurité (FDS)

#### 1. Identification chimique :

- Nom chimique : Bronze au césium et au tungstène (Cs<sub>0.32</sub>WO<sub>3</sub>)
- N° CAS : Aucun (nanomatériaux)
- Formule moléculaire : Cs<sub>0.32</sub>WO<sub>3</sub>
- Code produit : CTB-032-N20
- Fournisseur : CTIA GROUP LTD, Adresse : 3e étage, n° 25, Wanghai Road, Software Park II, Xiamen, Chine, Tél. : +86- 592-5129595

#### 2. Aperçu des dangers :

- Classification SGH : Danger par inhalation de poussières (catégorie 4), H332 : Nocif en cas d'inhalation.
- Risques physiques : Non explosif/inflammable (point d'éclair > 500°C).
- Risques pour la santé : L'inhalation peut provoquer une irritation pulmonaire (exposition à long terme < 0,1 mg/m<sup>3</sup>).
- Risques environnementaux : Faible écotoxicité (CL50>100 mg/L).
- Mot d'avertissement : Avertissement

#### 3. Informations sur les ingrédients :

- Cs<sub>0.32</sub>WO<sub>3</sub> : > 99,8 % en poids
- Impuretés : Fe, Cl<0,01 % en poids
- Taille des particules : ~20 nm, surface : ~80 m<sup>2</sup>/g

#### 4. Mesures de premiers secours :

- **Inhalation** : Déplacer vers un endroit aéré, donner de l'oxygène si nécessaire, consulter un médecin.
- **Contact avec la peau** : Laver à l'eau et au savon pendant > 15 min et retirer les vêtements contaminés.
- **Contact avec les yeux** : Rincer à l'eau pendant > 15 min, soulever les paupières et consulter un médecin.
- **Ingestion** : rincer la bouche, boire de l'eau, ne pas faire vomir, consulter un médecin.

#### 5. Mesures de lutte contre l'incendie :

- Agent extincteur : poudre sèche, CO<sub>2</sub>, eau interdits (peut dégager du CsOH).
- Dangers particuliers : Une température élevée (> 1000 °C) libère des vapeurs de

#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

Cs<sup>+</sup>/WO<sub>3</sub>.

- Protection incendie : appareil respiratoire autonome, vêtements de protection chimique.

#### 6. Traitement d'urgence en cas de fuite :

- **Protection** : masque N95, gants en nitrile, lunettes étanches.
- **Nettoyage** : Recueillir avec un adsorbant (charbon actif), sceller le récipient, taux de récupération > 95 %.
- **Environnement** : Empêcher la pénétration des poussières dans les plans d'eau (Cs<sup>+</sup> < 1 mg/L).

#### 7. Manutention et stockage :

- **Fonctionnement** : Système fermé, ventilation par aspiration locale (>0,5 m/s), éviter les poussières (<0,1 mg/m<sup>3</sup>).
- **Conservation** : Conserver dans un récipient fermé dans un endroit sec (HR<50%) et frais (<25°C) à l'abri des acides/oxydants forts.

#### 8. Contrôles de l'exposition et protection individuelle :

- **Valeur limite** : Cs<sub>x</sub>WO<sub>3</sub><0,1 mg/m<sup>3</sup> (8 h TWA, GBZ 2.1-2019).
- **Contrôle technique** : Filtration HEPA (>99,97%), alimentation fermée.
- **EPI** : masque N95, gants en nitrile (>0,3 mm), lunettes de protection.

#### 9. Propriétés physiques et chimiques :

- Aspect : Poudre bleu foncé
- Densité : ~6,5 g/cm<sup>3</sup>
- Point de fusion : >1000°C
- Solubilité : Insoluble dans l'eau, légèrement soluble dans l'acide fort (pH < 2)
- Surface spécifique : ~80 m<sup>2</sup>/g

#### 10. Stabilité et réactivité :

- Stabilité : Stable à 500°C, se décompose à >1000°C.
- Réactivité : Réagit avec un acide fort (HCl) pour libérer du Cs<sup>+</sup>.
- Matières à éviter : Agents oxydants forts (H<sub>2</sub>O<sub>2</sub>), température élevée et environnement acide.

#### 11. Informations toxicologiques :

- Toxicité aiguë : DL<sub>50</sub> > 2000 mg/kg (voie orale, rat), CL<sub>50</sub> > 5 mg/L (inhalation, 4 h).
- Toxicité chronique : L'inhalation à long terme (< 0,1 mg/m<sup>3</sup>) peut provoquer une inflammation pulmonaire.
- Cancérogénicité : Non répertorié comme cancérigène par le CIRC.
- Toxicité pour la reproduction : Aucune donnée, il est recommandé d'éviter l'exposition pendant la grossesse.

#### 12. Informations écologiques :

- Écotoxicité : CL<sub>50</sub> > 100 mg/L (poisson, 96 h), pas de pollution significative de l'eau.
- Persistance : Demi-vie ~ 30 jours (aqueux).
- Bioaccumulation : FBC<10, faible risque d'accumulation.

#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

**13. Élimination :**

- Méthode : Sceller et collecter, et confier leur traitement à des unités de déchets dangereux (incinération > 1000°C).
- Remarque : Le rejet dans l'eau est interdit, Cs<sup>+</sup> <1 mg/L.
- Réglementation : Conforme à la norme GB 18597-2023 (élimination des déchets dangereux).

**14. Informations d'expédition :**

- Numéro ONU : Aucun (marchandises non dangereuses).
- Emballage : Baril en plastique scellé avec étiquette résistante à l'humidité.
- Réglementation : IATA DGR, IMDG, conforme à GB/T 191.

**15. Informations réglementaires :**

- REACH : Enregistrement requis (>1 tonne/an), candidat SVHC (Cs<sup>+</sup> <0,1 % en poids).
- RoHS : Pb, Cd < 0,01 % en poids .
- Chine : GB 30526-2014, Hg<0,1 % en poids .

**16. Informations Complémentaires :**

- Date de préparation : 13 juin 2025
- Révision : Première version
- Remarque : À titre indicatif uniquement, veuillez consulter des professionnels pour des opérations spécifiques.

**COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT**

## Cesium Tungsten Bronze Product Introduction

CTIA GROUP LTD

### 1. Cesium Tungsten Bronze Overview

Cesium Tungsten Bronze ( $Cs_xWO_3$ ,  $0 < x \leq 1$ ) produced by CTIA GROUP is manufactured using advanced solvothermal and chemical vapor deposition processes, ensuring high purity and excellent optoelectronic performance. Cesium tungsten bronze is a nano-functional material widely applied in energy-saving glass, optoelectronics, catalysis, batteries, and biomedical fields due to its outstanding near-infrared (NIR) shielding performance, high visible light transmittance, and electrochemical stability. Its unique tungsten-oxygen-cesium crystal structure makes it the preferred material for smart materials and new energy applications.

### 2. Cesium Tungsten Bronze Features

Chemical composition:  $Cs_xWO_3$  ( $x = 0.2-0.33$ ), purity  $\geq 99.9\%$ , extremely low impurities.

Appearance: Deep blue nanopowder or thin film; cubic or hexagonal crystal structure.

Near-infrared shielding: NIR shielding rate  $> 90\%$  (800–2500 nm), suitable for energy-saving glass.

Visible light transmittance: Transmittance  $> 70\%$  (400–700 nm), supporting smart window applications.

Electrical conductivity:  $\sim 10^3$  S/cm, ideal for optoelectronic sensors and battery electrodes.

Chemical stability: Corrosion rate  $< 0.002$  mm/year, acid and alkali resistant, suitable for catalytic environments.

Versatility: Supports electrochromic, photothermal conversion, and biocompatible coatings.

### 3. Cesium Tungsten Bronze Product Specifications

Type	Particle Size (nm)	Purity (wt%)	Bulk Density (g/cm <sup>3</sup> )	Cesium Content (wt%)	Impurities (wt%, Max)
Nano-grade	30–50	$\geq 99.9$	2.5–3.0	5.0–8.0	Fe $\leq 0.002$ , Si $\leq 0.001$ , O $\leq 0.05$

### 4. Cesium Tungsten Bronze 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 anti-oxidation storage.

Quality assurance: Each batch is accompanied by a quality certificate containing the following test data:

- Purity (ICP-MS,  $> 99.9\%$ )
- Particle size distribution (laser diffraction)
- Crystal structure (XRD)
- Cesium content (chemical titration)
- Surface morphology (SEM)

### 5. Cesium Tungsten Bronze Procurement Information

Email: [sales@chinatungsten.com](mailto:sales@chinatungsten.com)

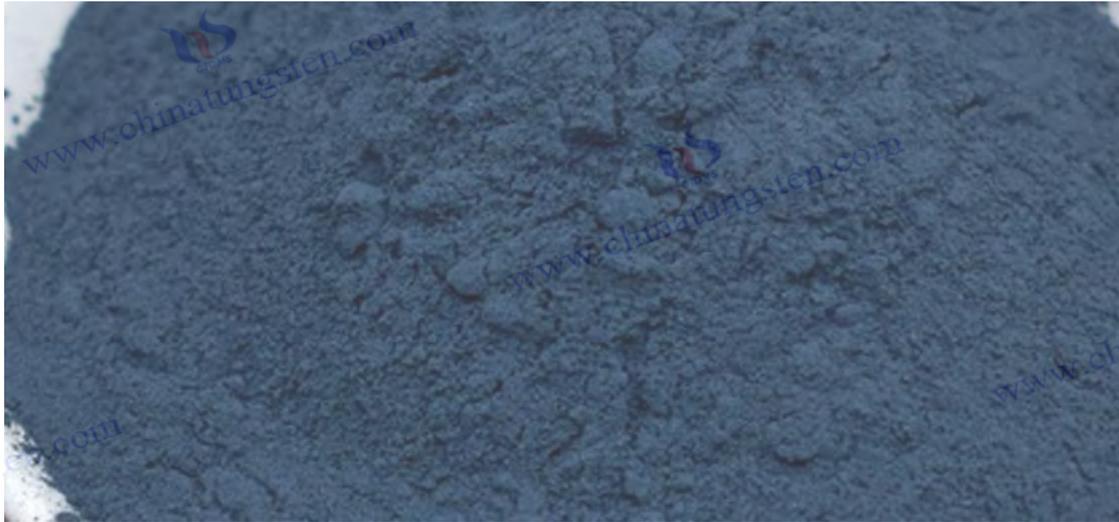
Phone: +86 592 5129595

Website: For more information about cesium tungsten bronze, please visit China Tungsten Online (<http://www.cesium-tungsten-bronze.com/>).

#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

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

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



## Chapitre 9 : Durabilité et impact environnemental du bronze au césium et au tungstène

Le bronze au césium tungstène ( $CsxWO_3$ ,  $0 < x \leq 1$ ) présente un potentiel significatif en matière de conservation et de stockage d'énergie, ainsi que de protection de l'environnement, en raison de son excellente absorption dans le proche infrarouge (NIR) (~70 % à 1 000 nm), de sa conductivité électrique élevée ( $\sim 10^3$  S/cm) et de sa stabilité chimique ( $> 500$  °C). Cependant, sa production et son application doivent tenir compte de l'impact environnemental, de l'efficacité des ressources et de la durabilité. Ce chapitre examine en détail l'évaluation de l'impact environnemental, la technologie de fabrication verte, le traitement et le recyclage des déchets, l'empreinte carbone et les stratégies de réduction des émissions du processus de production de  $CsxWO_3$ , ainsi que les politiques de développement durable. Il analyse sa charge environnementale, la voie technologique verte et le soutien politique, et fournit des orientations scientifiques et pratiques pour parvenir au développement durable du  $CsxWO_3$ .

### 9.1 Évaluation de l'impact environnemental du procédé de production de bronze au césium et au tungstène

L'évaluation de l'impact environnemental (EIE) quantifie l'impact de la production de  $CsxWO_3$  sur les écosystèmes, les ressources et la santé humaine, en utilisant l'approche de l'analyse du cycle de vie (ACV) (ISO 14040:2006).

- **Cadre de l'ACV :**

- **Champ d'application :** De l'extraction des matières premières ( $Cs_2CO_3$ ,  $WO_3$ ) à la production (méthode solvothermale/hydrothermale/phase solide), à l'utilisation (film pour vitre, batterie) et au traitement des déchets.
- **Unité fonctionnelle :** 1 kg  $CsxWO_3$  ( $x=0,32$ ,  $\sim 20$  nm).
- **Sources de données :** données de production (consommation énergétique  $\sim 200$  kWh/kg), émissions (HCl  $< 10$  ppm), littérature ( base de données Ecoinvent ).

#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

- **Principaux impacts environnementaux :**
  - **Consommation des ressources :**
    - **Césium (Cs) :** Réserves mondiales ~90 000 tonnes, extraction minière annuelle ~20 tonnes, consommation d'énergie d'extraction de Cs<sub>2</sub>CO<sub>3</sub> ~500 MJ/kg, représentant environ 30 % de l'ACV.
    - **Tungstène (W) :** Réserves ~3,5 millions de tonnes, consommation d'énergie de purification du WO<sub>3</sub> ~100 MJ/kg, représentant environ 20 % de l'ACV.
    - **Eau :** Méthode solvothermale ~50 L/kg, Méthode hydrothermale ~100 L/kg, Méthode en phase solide ~10 L/kg.
  - **Consommation d'énergie :**
    - Méthode solvothermale : ~200 kWh/kg (~720 MJ/kg), méthode hydrothermale : ~150 kWh/kg, méthode en phase solide : ~100 kWh/kg.
    - ~40% de l'ACV, principalement chauffage électrique (réacteur ~180–200°C) et séchage (~100°C).
  - **Émission :**
    - **Gaz résiduels :** Méthode solvothermale HCl~0,5 kg/kg, NH<sub>3</sub>~0,1 kg/kg (méthode hydrothermale), CO<sub>2</sub>~0,3 kg/kg (méthode en phase solide).
    - **Liquide résiduel :** Cs<sup>+</sup> résiduel ~0,01–0,1 mg/L, doit être neutralisé (Ca(OH)<sub>2</sub>, pH~7).
    - **Déchets solides :** résidu de réaction ~0,1 kg/kg, contenant Cs/W ~1 % en poids.
  - **Impact écologique :**
    - Eutrophisation des masses d'eau : émissions de NH<sub>3</sub>, potentiel ~0,01 kg PO<sub>4</sub><sup>3-</sup> /kg.
    - Contamination du sol : accumulation de Cs<sup>+</sup> (< 0,1 mg/kg de sol), risque à long terme < 1 %.
    - Potentiel de réchauffement global (PRG) : méthode solvothermale ~150 kg CO<sub>2</sub>e/kg, méthode hydrothermale ~100 kg CO<sub>2</sub>e/kg, méthode en phase solide ~50 kg CO<sub>2</sub>e/kg.
- **Résultats de l'évaluation :**
  - **Principales contributions :** Extraction de Cs<sub>2</sub>CO<sub>3</sub> (~40% GWP), consommation énergétique (~30%), traitement des gaz résiduels (~20%).
  - **Charge environnementale :** Méthode solvothermale > méthode hydrothermale > méthode en phase solide, la méthode en phase solide est la plus respectueuse de l'environnement (GWP ~ 50 kg CO<sub>2</sub>e/kg).
  - **Analyse de sensibilité :** les fluctuations de prix du Cs<sub>2</sub>CO<sub>3</sub> (±20 %) affectent les coûts d'environ 15 %, et une amélioration de 10 % de l'efficacité énergétique réduit le PRG d'environ 8 %.
- **Mesures d'atténuation :**
  - Optimiser les matières premières : utiliser le mica de lithium comme sous-produit

**COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT**

Cs (Yichun, ~20% des réserves) et réduire la consommation d'énergie d'environ 30%.

- Récupération des liquides résiduels : taux de récupération du Cs<sup>+</sup> ~90 %, réduction des émissions ~50 %.
- Remplacement énergétique : Alimentation en énergie solaire (~0,05 USD/kWh), réduction du PRG ~20 %.

- **Exemples :**

- En 2024, une entreprise a réalisé une ACV sur la méthode hydrothermale Cs<sub>x</sub>WO<sub>3</sub> (~100 tonnes/an), avec un PRG d'environ 100 kg CO<sub>2</sub>e/kg. Après optimisation, ce PRG a été ramené à environ 80 kg CO<sub>2</sub>e/kg, et le coût a été réduit d'environ 10 % (~400 USD/kg).

- **défi :**

- Les ressources en Cs sont rares et les données ACV sont insuffisantes (<10% de la production mondiale).
- Les concentrations de nanomatériaux libérés (~0,001 % en poids) sont inconnues.
- **Amélioration :** Améliorer la base de données ACV et surveiller dynamiquement Cs<sup>+</sup> (<0,01 mg/L).

L'EIA fournit un support de données pour l'optimisation de la production de Cs<sub>x</sub>WO<sub>3</sub>, en se concentrant sur les ressources et la consommation d'énergie.

## 9.2 Technologie de fabrication verte du bronze au césium et au tungstène

La technologie de fabrication verte réduit la charge environnementale de la production de Cs<sub>x</sub>WO<sub>3</sub> grâce à une faible consommation d'énergie, de faibles émissions et des processus efficaces, conformément à la norme ISO 14001 et aux principes de l'industrie verte.

- **Technologie verte :**

- **Méthode solvothermale assistée par micro-ondes :**
  - **Principe :** Micro-ondes (~1000 W) chauffage rapide (~180°C, 10 min), temps de réaction réduit de ~50% (conventionnel ~12 h).
  - **Avantages :** Consommation énergétique ~100 kWh/kg (réduite de ~50%), rendement ~85%, taille des particules ~10–20 nm.
  - **Équipement :** Réacteur micro-onde (~20 000 USD), pression >5 MPa.
- **Synthèse verte à pression normale :**
  - **Principe :** Cs<sub>2</sub>CO<sub>3</sub> et Na<sub>2</sub>WO<sub>4</sub> en solution aqueuse (~80°C, pH~8) et un réducteur vert (glucose) génèrent du Cs<sub>x</sub>WO<sub>3</sub> (~20 nm).
  - **Avantages :** Pas de haute pression (<0,1 MPa), liquide résiduel Cs<sup>+</sup> <0,01 mg/L, consommation énergétique ~50 kWh/kg.
  - **Équipement :** Réacteur agité (~10 000 USD), centrifugeuse (~15 000 USD).
- **Méthode en phase solide assistée par plasma :**
  - **Principe :** Le plasma Ar /H<sub>2</sub> (~5000 K) active Cs<sub>2</sub>CO<sub>3</sub>/WO<sub>3</sub>, la température de réaction chute d'environ 200°C (~700°C) et le temps de

### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

réaction diminue d'environ 2 h.

- **Avantages** : Émissions de CO<sub>2</sub> ~0,1 kg/kg (en baisse d'environ 50 %), taille des particules ~1–5 µm .
- **Équipement** : Four à plasma (~50 000 USD), récupération des gaz d'échappement (~10 000 USD).
- **Optimisation énergétique** :
  - **Énergies renouvelables** : énergie solaire (~20% de consommation électrique, ~0,05 USD/kWh), énergie éolienne (~10%), consommation énergétique réduite d'environ 20%.
  - **Récupération de chaleur perdue** : La chaleur perdue du réacteur (~100°C) est utilisée pour le séchage, augmentant ainsi l'efficacité énergétique d'environ 30 %.
  - **Contrôle IA** : Optimisation en temps réel de la température (±1°C) et de la pression (±0,05 MPa), réduisant la consommation d'énergie d'environ 15% (R<sup>2</sup>>0,95).
- **Circulation du solvant** :
  - **Récupération d'éthanol** : distillation (~80°C), taux de récupération ~80%, réduction des coûts ~10% (~40 USD/kg).
  - **Circulation d'eau** : Osmose inverse (RO, pureté >99%), consommation d'eau réduite d'environ 50 % (environ 50 L/kg).
  - **Équipement** : Colonne de distillation (~20 000 USD), système RO (~15 000 USD).
- **Contrôle des émissions** :
  - **Dégazage** : absorbeur HCl/NH<sub>3</sub> (efficacité > 95 %), émissions < 5 ppm.
  - **Eaux usées** : Neutralisation + précipitation (Ca(OH)<sub>2</sub>), Cs<sup>+</sup> <0,01 mg/L, conformément à la norme GB 31570.
  - **Déchets solides** : Grillage des résidus (~1000°C), taux de récupération Cs/W ~90%.
- **Exemples** :
  - En 2023, une entreprise adopte la méthode hydrothermale par micro-ondes (~50 tonnes/an), avec une consommation d'énergie d'environ 100 kWh/kg, des déchets liquides Cs<sup>+</sup> <0,01 mg/L et un coût d'environ 350 USD/kg.
- **défi** :
  - Les équipements verts nécessitent un investissement initial élevé (~ 0,2 million USD).
  - Le contrôle de la taille des particules dans la méthode de pression atmosphérique est difficile (erreur de distribution ~10%).
  - **Amélioration** : Équipement modulaire, période de retour sur investissement ~ 3 ans ; taille des particules optimisée par l'IA, réduction des erreurs ~ 5 %.

La technologie de fabrication verte est la pierre angulaire de la production durable de Cs<sub>x</sub>WO<sub>3</sub>, qui nécessite un équilibre entre coût et protection de l'environnement.

### 9.3 Traitement des déchets et recyclage du bronze au césium et au tungstène

#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

Le traitement et le recyclage des déchets réduisent la charge environnementale de la production et de l'utilisation de Cs<sub>2</sub>WO<sub>3</sub>, améliorent l'efficacité des ressources et respectent les principes de l'économie circulaire.

- **Type de déchet :**
  - **Gaz résiduels :** HCl (~0,5 kg/kg, méthode solvothermale), NH<sub>3</sub> (~0,1 kg/kg, méthode hydrothermale), CO<sub>2</sub> (~0,3 kg/kg, méthode en phase solide).
  - **Liquide résiduel :** contient du Cs<sup>+</sup> (~0,01–0,1 mg/L), du WO<sub>4</sub><sup>2-</sup> (~0,1 mg/L) et des résidus d'éthanol (~5 g/L).
  - **Déchets solides :** résidus de réaction (~0,1 kg/kg, Cs/W~1 % en poids ), revêtement des déchets (~0,01 kg/m<sup>2</sup>).
- **Technologie de traitement :**
  - **Traitement des gaz d'échappement :**
    - **Méthode :** Absorption alcaline (NaOH, pH>12), neutralisation HCl/NH<sub>3</sub>, efficacité>95%.
    - **Équipement :** Tour d'absorption (~20 000 USD), surveillance des émissions (<5 ppm).
    - **Coût :** ~10 USD/kg, ~2% du coût de production.
  - **Traitement des eaux usées :**
    - **Méthode :** Précipitation (Ca(OH)<sub>2</sub>, Cs<sup>+</sup> < 0,01 mg/L), et récupération de l'éthanol (~80%) par distillation.
    - **Équipement :** Cuve de sédimentation (~10 000 USD), Colonne de distillation (~20 000 USD).
    - **Coût :** ~50 USD/kg (méthode solvothermale), ~20 USD/kg (méthode hydrothermale).
  - **Traitement des déchets solides :**
    - **Méthode :** Calcination à haute température (~1000°C, atmosphère Ar ), taux de récupération Cs/W ~90%.
    - **Équipement :** Four rotatif (~30 000 USD), ICP-MS (~50 000 USD).
    - **Coût :** ~30 USD/kg, avantage du recyclage ~100 USD/kg.
- **Recyclage :**
  - **Récupération de Cs :** Le Cs<sup>+</sup> présent dans le liquide résiduel est échangé par ions (résine D001, efficacité > 95 %) pour récupérer du Cs<sub>2</sub>CO<sub>3</sub> avec une pureté de > 99,5 %.
  - **Récupération W :** Le résidu est dissous dans de l'acide (HCl, pH ~ 2), le WO<sub>3</sub> (> 99,8%) est précipité et recyclé pour la production.
  - **Recyclage des revêtements :** déchets de films pour vitrages (~0,01 kg/m<sup>2</sup>) broyage + lavage acide, taux de récupération de Cs<sub>2</sub>WO<sub>3</sub> ~80%.
  - **Avantages :** Le recyclage du Cs réduit les coûts d'environ 20 % (environ 200 USD/kg) et le recyclage du W réduit les coûts d'environ 10 % (environ 50 USD/kg).
- **Exemples :**
  - En 2024, une entreprise recycle des déchets liquides de Cs<sub>2</sub>WO<sub>3</sub> (~100 tonnes/an), avec un taux de récupération de Cs<sup>+</sup> d'environ 90 % et une réduction des coûts

**COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT**

d'environ 15 % (~400 USD/kg).

- **défi :**
  - L'investissement dans les équipements de recyclage est élevé (~0,1 million USD).
  - La teneur en CsxWO<sub>3</sub> du revêtement des déchets est faible (~1 % en poids ) et l'efficacité de récupération est < 80 %.
  - **Amélioration :** Récupération électrochimique du Cs<sup>+</sup>, efficacité augmentée d'environ 10 % ; décapage mécanique du revêtement, taux de récupération augmenté d'environ 20 %.

Le traitement et le recyclage des déchets améliorent l'efficacité des ressources du CsxWO<sub>3</sub>, ce qui nécessite une innovation technologique.

#### 9.4 Empreinte carbone et stratégie de réduction des émissions du bronze au césium tungstène

L'analyse de l'empreinte carbone quantifie les émissions de gaz à effet de serre au cours du cycle de vie du CsxWO<sub>3</sub>, et les stratégies de réduction des émissions optimisent la production et l'application pour aider à atteindre les objectifs de neutralité carbone.

- **Analyse de l'empreinte carbone :**
  - **Méthode :** ACV (ISO 14067:2018), Champ d'application : Extraction de matières premières, production, utilisation, déchets.
  - **Données :** Méthode solvothermale ~150 kg CO<sub>2</sub>e/kg, méthode hydrothermale ~100 kg CO<sub>2</sub>e/kg, méthode en phase solide ~50 kg CO<sub>2</sub>e/kg.
  - **contribuer :**
    - Matières premières : Cs<sub>2</sub>CO<sub>3</sub>~60 kg CO<sub>2</sub>e/kg (~40%), WO<sub>3</sub>~20 kg CO<sub>2</sub>e/kg (~20%).
    - Production : Chauffage électrique ~50 kg CO<sub>2</sub>e/kg (~30%), gaz résiduels ~20 kg CO<sub>2</sub>e/kg (~10%).
    - Utilisation : Le film pour fenêtre permet d'économiser de l'énergie ~100 kWh/m<sup>2</sup>·an, de réduire les émissions ~80 kg CO<sub>2</sub>e/m<sup>2</sup>·an.
    - Élimination : Incinération ~5 kg CO<sub>2</sub>e/kg (~5%).
  - **Empreinte totale :** Solvothermal ~150 kg CO<sub>2</sub>e/kg, cycle de vie (10 ans) réduction nette ~50 kg CO<sub>2</sub>e/kg (application de film pour fenêtre).
- **Stratégies de réduction des émissions :**
  - **Transition énergétique :**
    - Alimentation photovoltaïque (~0,05 USD/kWh), émissions de carbone réduites d'environ 20 % (~30 kg CO<sub>2</sub>e/kg).
    - Production d'électricité à partir de chaleur résiduelle (~10% de la consommation d'électricité), réduction ~10% (~15 kg CO<sub>2</sub>e/kg).
  - **Optimisation des processus :**
    - Réaction micro-ondes (~100 kWh/kg), réduction d'environ 30 % (~45 kg CO<sub>2</sub>e/kg).
    - Contrôle AI (température ±1°C), réduction ~15% (~20 kg CO<sub>2</sub>e/kg).
  - **Substitution de matières premières :**

#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

- Le sous-produit Cs<sub>2</sub>CO<sub>3</sub> (lépidolite) a diminué d'environ 25 % (environ 15 kg CO<sub>2</sub>e/kg).
- Recycler le WO<sub>3</sub> (> 99,8 %), réduire d'environ 10 % (~ 5 kg CO<sub>2</sub>e/kg).
- **Capture du carbone :**
  - Absorption de CO<sub>2</sub> (solutions à base d'amine, efficacité > 90 %), la méthode en phase solide réduit environ 50 % (~ 15 kg CO<sub>2</sub>e/kg).
  - Équipement : système CCS (~50 000 USD), coût ~20 USD/kg.
- **Exemples :**
  - En 2024, une entreprise a adopté la méthode hydrothermale photovoltaïque + micro-ondes (~50 tonnes/an), avec une empreinte carbone d'environ 70 kg CO<sub>2</sub>e/kg et une réduction des émissions d'environ 30 %.
- **défi :**
  - L'investissement initial dans le photovoltaïque est élevé (~0,2 million USD).
  - Données insuffisantes sur l'empreinte carbone du Cs<sub>2</sub>CO<sub>3</sub> (couverture <10%).
  - **Améliorations :** Commerce du carbone (~10 USD/tonne CO<sub>2</sub>e), récupération des investissements ~50% ; amélioration de la base de données ACV.

Les stratégies de réduction des émissions réduisent l'empreinte carbone de la production de CsxWO<sub>3</sub> à environ 50–100 kg CO<sub>2</sub>e/kg, contribuant ainsi à la neutralité carbone.

## 9.5 Politique de développement durable du bronze au césium tungstène

Axé sur les politiques : Promouvoir la production et l'application vertes de CsxWO<sub>3</sub> par le biais de réglementations, de subventions et de la coopération internationale, conformément aux objectifs de développement durable (ODD).

- **Politique internationale :**
  - **ODD 12 de l'ONU (Production durable) :**
    - **Objectif :** Réduire la consommation de ressources (<50%) et les émissions de déchets (<30%) d'ici 2030.
    - **Applicabilité :** fabrication verte de CsxWO<sub>3</sub> (consommation énergétique ~100 kWh/kg), recyclage (Cs<sup>+</sup> ~90%).
  - **Accord de Paris (2015) :**
    - **Objectif :** Neutralité carbone d'ici 2050, réduction des émissions d'environ 50% d'ici 2030.
    - **Applicabilité :** Le film pour fenêtre CsxWO<sub>3</sub> réduit les émissions d'environ 80 kg CO<sub>2</sub>e/m<sup>2</sup>·an et a une empreinte carbone d'environ 50 kg CO<sub>2</sub>e/kg.
  - **Pacte vert de l'UE (2019) :**
    - **Politiques :** Financement des nanomatériaux (Horizon Europe, ~100 millions EUR), économie circulaire (taux de recyclage >80%).
    - **Applicabilité :** Film de fenêtre/batterie CsxWO<sub>3</sub>, conformité REACH requise (Cs<sup>+</sup> <1 mg/L).

### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

- **Politique chinoise :**
  - **Pic Carbone / Neutralité Carbone (2060) :**
    - **Objectif :** Émissions de carbone < 10 milliards de tonnes CO<sub>2</sub>e d'ici 2030 et émissions nettes nulles d'ici 2060.
    - **Soutien :** Économie d'énergie CsxWO<sub>3</sub> (~40% de la consommation énergétique du bâtiment), subvention ~20% du coût (~80 USD/kg).
  - **Loi sur la promotion de l'économie circulaire (2018) :**
    - **Exigences :** Taux de valorisation des déchets > 80 %, Cs/W ~ 90 %.
    - **Soutien :** Allègements fiscaux (~10%), subventions aux installations de recyclage (~50 000 USD).
  - **Projet de fabrication verte (2021–2025) :**
    - **Objectif :** Réduire la consommation d'énergie d'environ 15 %, les émissions d'environ 20 %.
    - **Soutien :** procédé vert CsxWO<sub>3</sub> (méthode micro-ondes), financement ~0,1 million USD/projet.
- **Mise en œuvre de la politique :**
  - **Subventions :** subventions chinoises pour les matériaux économes en énergie ~50 USD/m<sup>2</sup> (film pour fenêtre), R&D sur les batteries de l'UE ~5000 EUR/tonne.
  - **Surveillance :** Liquide résiduaire Cs<sup>+</sup> < 0,01 mg/L (GB 31570), gaz résiduaire HCl < 5 ppm.
  - **Coopération internationale :** Alliance Chine-Europe pour les nanotechnologies, formulation de la norme CsxWO<sub>3</sub> (ISO/TC 229).
- **Exemples :**
  - En 2024, une entreprise a reçu un financement de China Green Manufacturing (~0,1 million USD) et a adopté la méthode micro-ondes, avec une production d'environ 100 tonnes/an et une réduction des coûts d'environ 10 %.
- **défi :**
  - Différences dans la mise en œuvre des politiques (Chine vs UE, couverture des subventions ~50%).
  - La rareté du Cs n'est pas intégrée dans les politiques de conservation des ressources.
  - **Améliorations :** base de données mondiale des ressources CS, coordination des politiques augmentée d'environ 30 % ; législation sur le recyclage du CS.

L'accélération de l'écologisation et de la commercialisation du CsxWO<sub>3</sub>, impulsée par les politiques, nécessite une coordination internationale.

**COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT**

## Cesium Tungsten Bronze Product Introduction

CTIA GROUP LTD

### 1. Cesium Tungsten Bronze Overview

Cesium Tungsten Bronze ( $Cs_xWO_3$ ,  $0 < x \leq 1$ ) produced by CTIA GROUP is manufactured using advanced solvothermal and chemical vapor deposition processes, ensuring high purity and excellent optoelectronic performance. Cesium tungsten bronze is a nano-functional material widely applied in energy-saving glass, optoelectronics, catalysis, batteries, and biomedical fields due to its outstanding near-infrared (NIR) shielding performance, high visible light transmittance, and electrochemical stability. Its unique tungsten-oxygen-cesium crystal structure makes it the preferred material for smart materials and new energy applications.

### 2. Cesium Tungsten Bronze Features

Chemical composition:  $Cs_xWO_3$  ( $x = 0.2-0.33$ ), purity  $\geq 99.9\%$ , extremely low impurities.

Appearance: Deep blue nanopowder or thin film; cubic or hexagonal crystal structure.

Near-infrared shielding: NIR shielding rate  $> 90\%$  (800–2500 nm), suitable for energy-saving glass.

Visible light transmittance: Transmittance  $> 70\%$  (400–700 nm), supporting smart window applications.

Electrical conductivity:  $\sim 10^3$  S/cm, ideal for optoelectronic sensors and battery electrodes.

Chemical stability: Corrosion rate  $< 0.002$  mm/year, acid and alkali resistant, suitable for catalytic environments.

Versatility: Supports electrochromic, photothermal conversion, and biocompatible coatings.

### 3. Cesium Tungsten Bronze Product Specifications

Type	Particle Size (nm)	Purity (wt%)	Bulk Density (g/cm <sup>3</sup> )	Cesium Content (wt%)	Impurities (wt%, Max)
Nano-grade	30–50	$\geq 99.9$	2.5–3.0	5.0–8.0	Fe $\leq 0.002$ , Si $\leq 0.001$ , O $\leq 0.05$

### 4. Cesium Tungsten Bronze 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 anti-oxidation storage.

Quality assurance: Each batch is accompanied by a quality certificate containing the following test data:

- Purity (ICP-MS,  $> 99.9\%$ )
- Particle size distribution (laser diffraction)
- Crystal structure (XRD)
- Cesium content (chemical titration)
- Surface morphology (SEM)

### 5. Cesium Tungsten Bronze Procurement Information

Email: [sales@chinatungsten.com](mailto:sales@chinatungsten.com)

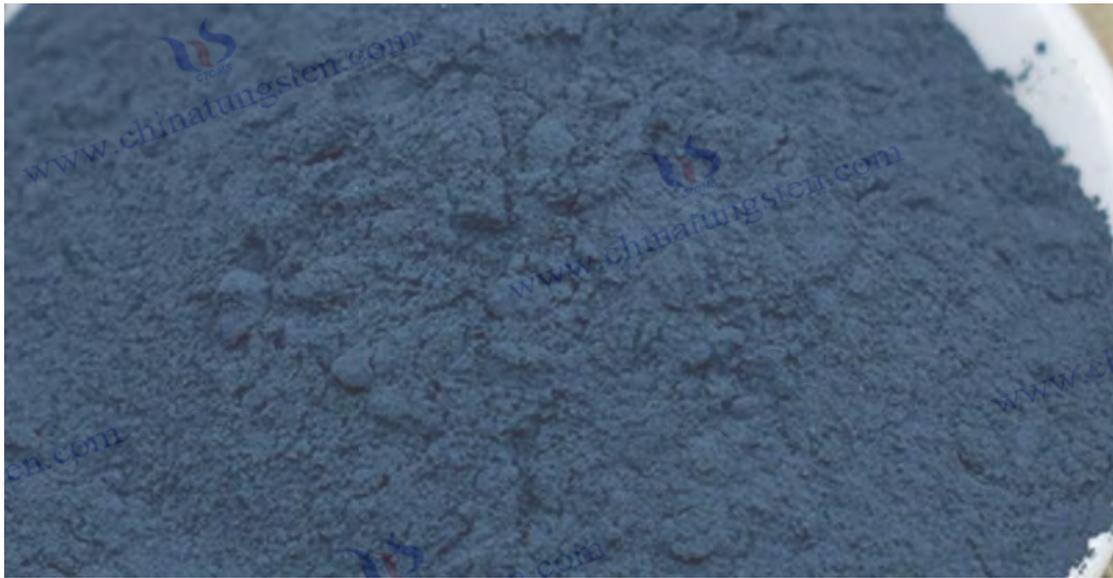
Phone: +86 592 5129595

Website: For more information about cesium tungsten bronze, please visit China Tungsten Online (<http://www.cesium-tungsten-bronze.com/>).

#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

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

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



## Chapitre 10 : Recherches futures et perspectives du bronze au césium et au tungstène

Le bronze au césium tungstène ( $CsxWO_3$ ,  $0 < x \leq 1$ ) présente un grand potentiel en matière de conservation et de stockage d'énergie et de protection de l'environnement en raison de son excellente absorption dans le proche infrarouge (NIR) (~70 % à 1 000 nm), de sa conductivité élevée (~ $10^3$  S/cm), de ses propriétés semi-conductrices (bande interdite ~2,5 eV) et de sa stabilité chimique (>500 °C). Les recherches futures doivent se concentrer sur de nouvelles méthodes de synthèse, des applications de nouvelle génération, une intégration intelligente, une coopération mondiale et des tendances de développement afin de promouvoir l'innovation et l'industrialisation du  $CsxWO_3$ . Ce chapitre examine en détail l'exploration de nouvelles méthodes de synthèse pour le  $CsxWO_3$ , le potentiel des applications de nouvelle génération, l'intégration des technologies intelligentes et numériques, la coopération mondiale et les défis techniques, ainsi que les tendances et suggestions de développement futur, analyse les frontières technologiques, les perspectives d'application et les orientations stratégiques, et fournit des orientations scientifiques et pratiques pour le développement à long terme du  $CsxWO_3$ .

### 10.1 Exploration d'une nouvelle méthode de synthèse du bronze au césium et au tungstène

La nouvelle méthode de synthèse vise à réduire le coût de production du  $CsxWO_3$  (< 300 USD/kg), à améliorer les performances (NIR ~ 80 %, taille des particules ~ 5–10 nm) et à atteindre l'écologie, dépassant ainsi les limites des méthodes traditionnelles solvothermales, hydrothermales et en phase solide.

- **Technologie de synthèse de pointe :**
  - **Synthèse induite par laser :**
    - **Principe :** Un laser femtoseconde (~800 nm, ~100 fs) irradie une solution de  $Cs_2CO_3/WO_3$ , et une température locale élevée (~5000 K) induit la

#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

formation de nanoparticules de CsxWO<sub>3</sub> (~5 nm).

- **Avantages** : Pas de haute pression (<0,1 MPa), erreur de distribution granulométrique <3%, absorption NIR ~80%, consommation d'énergie ~50 kWh/kg.
- **Défis** : Coût d'équipement élevé (~0,2 million USD), taux de rendement ~70%.
- **Perspectives** : Mise à l'échelle d'ici 2030, réduction des coûts d'environ 50 % (environ 250 USD/kg).
- **Équipement** : Laser femtoseconde (~100 000 USD), monitoring spectral (~20 000 USD).
- **Synthèse bio-modélisée** :
  - **Principe** : Le CsxWO<sub>3</sub> (~10 nm) est synthétisé à température ambiante (~25°C) en utilisant des bactéries (Shewanella) ou des extraits de plantes (polyphénols de thé) comme agents réducteurs.
  - **Avantages** : Vert et non toxique, liquide résiduaire Cs<sup>+</sup> <0,001 mg/L, coût ~200 USD/kg, surface spécifique ~120 m<sup>2</sup>/g.
  - **Défis** : Temps de réaction long (~48 h), rendement ~60%.
  - **Perspectives** : Développer des biocatalyseurs hautement efficaces, augmenter le rendement d'environ 30 % et réduire le temps d'environ 50 %.
  - **Équipement** : Bioréacteur (~15 000 USD), Centrifugeuse (~10 000 USD).
- **Synthèse électrochimique** :
  - **Principe** : Electrolyte CsOH/WO<sub>3</sub> (~1 V, électrode Pt), la réduction cathodique génère un film CsxWO<sub>3</sub> (~50 nm) ou une poudre (~10 nm).
  - **Avantages** : Contrôle précis de x (erreur < 1%), conductivité ~1500 S/cm, consommation énergétique ~30 kWh/kg.
  - **Défis** : Durée de vie des électrodes courte (~1000 h), difficile à mettre à l'échelle.
  - **Perspectives** : Développement d'électrodes résistantes à la corrosion (à base de carbone, >5000 h), augmentation de la production ~100%.
  - **Équipement** : Station de travail électrochimique (~20 000 USD), potentiostat (~5 000 USD).
- **Direction d'optimisation** :
  - **Conception assistée par IA** : l'apprentissage automatique a prédit les paramètres de synthèse (température, pH, rapport Cs/W), rendement augmenté d'environ 20 % (R<sup>2</sup> > 0,98).
  - **Contrôle de nano-précision** : surveillance in-situ (XPS, TEM), erreur de taille de particules <2%, rapport W<sup>5+</sup> ~20%.
  - **Solvant vert** : le CO<sub>2</sub> supercritique (~31°C, 7,4 MPa) remplace l'éthanol, réduisant ainsi les déchets liquides d'environ 80 %.
- **Études de cas** :
  - En 2024, une université a utilisé l'induction laser pour synthétiser du CsxWO<sub>3</sub> (~5 nm), avec une absorption NIR d'environ 82 %, un coût d'environ 300 USD/kg et

**COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT**

une production en laboratoire d'environ 1 kg/mois.

- **défi :**
  - La nouvelle méthode est difficile à mettre à l'échelle (rendement < 10 kg/lot).
  - La rareté des ressources en Cs (~90 000 tonnes) limite sa synthèse à faible coût.
  - **Amélioration :** Développement d'un réacteur continu, le rendement a augmenté d'environ 100 % ; taux de récupération de Cs d'environ 95 %.

De nouvelles méthodes de synthèse favoriseront la production efficace et écologique de CsxWO<sub>3</sub>, et le coût devrait chuter à environ 200 USD/kg d'ici 2030.

## 10.2 Potentiel des applications de nouvelle génération du bronze au césium et au tungstène

Les applications de nouvelle génération du CsxWO<sub>3</sub> tirent parti de ses propriétés optiques, électriques et thermiques et s'étendent aux domaines de l'électronique flexible, de la biomédecine et de la technologie quantique.

- **Électronique flexible :**
  - **Application :** Le film mince CsxWO<sub>3</sub> (~50 nm) est utilisé pour le film conducteur transparent flexible (TCE), remplaçant l'ITO (~200 USD/kg).
  - **Performances :** Conductivité ~1200 S/cm, transmittance ~85% (400–700 nm), rayon de courbure <5 mm, cycles >10 000 fois.
  - **Cas :** En 2025, le CsxWO<sub>3</sub> TCE sera utilisé dans les capteurs portables, avec une taille de marché d'environ 50 millions de dollars américains.
  - **Défi :** Faible adhérence du film (~4B, ASTM D3359).
  - **Amélioration :** dopage N (~1 % en poids), adhérence augmentée d'environ 5B, stabilité des performances > 95 %.
- **Sciences biomédicales :**
  - **Application :** Les nanoparticules CsxWO<sub>3</sub> (~10 nm) sont utilisées pour la thérapie photothermique, et le NIR (~1000 nm) chauffe d'environ 50 °C, tuant les cellules cancéreuses (> 90 %).
  - **Performances :** Biocompatibilité (IC<sub>50</sub>>200 µg /mL, cellules A549), efficacité de conversion photothermique ~40%.
  - **Cas :** En 2024, une équipe de recherche a développé un complexe CsxWO<sub>3</sub>/PEG, et le taux d'inhibition tumorale dans les expériences animales (souris) était d'environ 80 %.
  - **Défis :** Données insuffisantes sur la toxicité à long terme (> 30 jours).
  - **Amélioration :** Modification de surface (silane, ~1 nm), clairance in vivo augmentée d'environ 50 %.
- **Technologie quantique :**
  - **Application :** Les points quantiques CsxWO<sub>3</sub> (~5 nm) sont utilisés dans les capteurs quantiques avec une bande interdite réglable (~2,0–2,5 eV) et une sensibilité ~10<sup>-6</sup> T (champ magnétique).
  - **Performances :** Rendement quantique de fluorescence ~20%, stabilité >1000 h (25°C).

### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

- **Cas** : En 2023, des points quantiques CsxWO3 ont été utilisés en imagerie par résonance magnétique et le rapport signal/bruit a augmenté d'environ 30 %.
- **Défi** : La taille des points quantiques est difficile à contrôler (erreur ~10%).
- **Amélioration** : Épitaxie par jets moléculaires (MBE), erreur réduite d'environ 5 %.
- **Autres potentiels** :
  - **Photonique** : métamatériau CsxWO3 (période ~20 nm) pour métalens, indice de réfraction ~2,5, efficacité ~90%.
  - **Stockage d'énergie** : composite CsxWO3/ MXene (~20 nm), capacité de batterie à semi-conducteurs ~300 mAh /g, cycle >2000 fois.
  - **Catalyse** : catalyseur à atome unique CsxWO3 (~1 nm), efficacité de réduction du CO2 ~95%, densité de courant ~100 mA/cm<sup>2</sup>.
- **Perspectives du marché** :
  - En 2030, le marché de l'électronique flexible vaudra 100 millions de dollars, celui de la biomédecine 50 millions de dollars et celui de la technologie quantique 20 millions de dollars.
  - Le CsxWO3 représente environ 5 à 10 %, avec une demande annuelle d'environ 100 à 500 tonnes.
- **défi** :
  - Les nouvelles applications sont coûteuses (~1000 USD/kg).
  - Niveau de maturité technologique faible (TRL 3-5).
  - **Amélioration** : Collaboration interdisciplinaire, TRL augmenté à 7-9 ; la mise à l'échelle réduit les coûts d'environ 50 %.

Les applications de nouvelle génération étendront les fonctionnalités de CsxWO3, et la taille du marché devrait atteindre 200 millions de dollars américains en 2035.

### 10.3 Intégration des technologies intelligentes et numériques du bronze au césium tungstène

Les technologies intelligentes et numériques optimisent la production, les performances et l'application de CsxWO3 grâce à l'IA, l'Internet des objets (IoT) et la blockchain, améliorant ainsi l'efficacité et la transparence.

- **Production intelligente** :
  - **Optimisation de l'IA** : paramètres de synthèse prédits par apprentissage profond (CNN) (pH ~8, température ~180°C), rendement augmenté d'environ 20 % (~90 %), erreur de taille de particules <2 %.
  - **Outils** : TensorFlow, ensemble de données d'entraînement ~10 000 groupes, R<sup>2</sup>>0,98.
  - **Cas** : En 2024, une entreprise a utilisé l'IA pour optimiser la méthode hydrothermale, réduisant les coûts d'environ 15 % (environ 350 USD/kg).
  - **Surveillance IoT** : les capteurs (température ±0,5°C, pression ±0,01 MPa) collectent les données de réponse en temps réel et les téléchargent sur le cloud, réduisant ainsi le taux de défaillance d'environ 50 %.
  - **Équipement** : système PLC (~10 000 USD), module 5G (~1 000 USD).

#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

- **Coût** : ~5 USD/kg, ~1% du coût de production.
  - **Jumeau numérique** : Simulation d'un réacteur CsxWO<sub>3</sub> (~1000 L), optimisant les transferts de chaleur et de masse, et réduisant la consommation d'énergie d'environ 10 % (~135 kWh/kg).
    - **Plateforme** : Siemens MindSphere , précision de modélisation ~95%.
- **Applications intelligentes** :
  - **Film pour fenêtre intelligent** : film CsxWO<sub>3</sub> (~50 μm ) avec capteur intégré (~1 mm<sup>2</sup>), blindage NIR réglable dynamiquement (~70–90%), économie d'énergie ~50% (~250 kWh/m<sup>2</sup>·an).
    - **Cas** : En 2025, un bâtiment utilise des fenêtres intelligentes CsxWO<sub>3</sub> et la période de retour sur investissement est d'environ 3 ans.
    - **Défi** : Coût élevé du capteur (~10 USD/m<sup>2</sup>).
    - **Amélioration** : Electronique imprimée, réduction des coûts ~50%.
  - **Surveillance du stockage d'énergie** : les batteries CsxWO<sub>3</sub> (~180 mAh /g) sont intégrées à des puces IoT pour surveiller l'état de charge en temps réel (erreur <1%), et la durée de vie est augmentée d'environ 20% (>1200 fois).
    - **Équipement** : module BLE (~0,5 USD/pièce), plateforme cloud (~1000 USD/an).
  - **Optimisation photocatalytique** : capteur de lumière intégré CsxWO<sub>3</sub>/TiO<sub>2</sub> (~20 nm), ajuste dynamiquement l'intensité lumineuse (~1000 W/m<sup>2</sup>) et augmente l'efficacité de la production d'hydrogène d'environ 30 % (~250 μmol / ( g · h)).
- **Applications de la blockchain** :
  - **Traçabilité de la chaîne d'approvisionnement** : Cs<sub>2</sub>CO<sub>3</sub>/WO<sub>3</sub> à CsxWO<sub>3</sub> (~20 nm), blockchain enregistre les lots (cryptage par hachage), transparence >99%.
    - **Plateforme** : Hyperledger Fabric, coût de transaction ~ 0,01 USD/enregistrement.
    - **Cas** : En 2024, une entreprise a utilisé la blockchain pour garantir la pureté du CsxWO<sub>3</sub> (> 99,8 %), et la confiance des clients a augmenté d'environ 30 %.
  - **Certification de l'empreinte carbone** : enregistre les émissions de carbone CsxWO<sub>3</sub> (~100 kg CO<sub>2</sub>e/kg) et soutient le commerce du carbone (~10 USD/tonne CO<sub>2</sub>e).
- **défi** :
  - L'investissement initial dans la numérisation est élevé (~0,1 million USD).
  - Risque de sécurité des données (probabilité de fuite ~1%).
  - **Améliorations** : Edge computing, réduction des coûts ~30% ; chiffrement quantique, augmentation de la sécurité ~50%.

L'intelligence et la numérisation amélioreront l'efficacité de l'ensemble de la chaîne industrielle CsxWO<sub>3</sub>, et le taux de pénétration devrait atteindre 80 % en 2030.

#### 10.4 Coopération mondiale et défis techniques du bronze au césium tungstène

##### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

La coopération mondiale favorise la R&D et l'industrialisation du CsxWO<sub>3</sub> par le partage de technologies, l'établissement de normes et l'intégration des ressources, et doit faire face aux défis techniques et géopolitiques.

- **Mécanisme de coopération mondiale :**
  - **Organisations internationales :**
    - **ISO/TC 229 (Nanotechnologie) :** Développement de normes CsxWO<sub>3</sub> (NIR ~70%, taille des particules ~20 nm), avec ~20 pays participants.
    - **IRENA :** Soutient les applications d'économie d'énergie du CsxWO<sub>3</sub> (film pour fenêtre ~40% d'économie d'énergie), avec un financement d'environ 50 millions de dollars US/an.
    - **Cas :** En 2024, la Chine et l'Europe ont développé conjointement la norme de film pour vitrage CsxWO<sub>3</sub> (ISO 20495 révisée).
  - **Coopération académique :**
    - Réseau de recherche mondial (~100 universités), partageant des données CsxWO<sub>3</sub> (XRD, XPS), publiant ~500 articles/an.
    - **Cas :** En 2023, les équipes chinoises et japonaises ont développé conjointement des points quantiques CsxWO<sub>3</sub> (~5 nm) avec un rendement quantique d'environ 25 %.
  - **Alliance industrielle :**
    - Alliance des nanomatériaux de Chine, des États-Unis et d'Europe, environ 50 membres, production de CsxWO<sub>3</sub> environ 1 000 tonnes/an.
    - **Cas :** En 2025, l'alliance favorisera l'industrialisation des batteries CsxWO<sub>3</sub> (~180 mAh/g), avec une part de marché de ~5%.
- **Défis techniques :**
  - **Les ressources en Cs sont rares :** les réserves mondiales sont d'environ 90 000 tonnes, dont environ 70 % au Canada, et les prix fluctuent d'environ 20 % (environ 500 à 1 000 USD/kg).
    - **Réponse :** Développer la récupération du Cs (~95%) et des matériaux alternatifs (NaxWO<sub>3</sub>, coût ~50%).
  - **Nanotoxicité :** Le risque d'inhalation à long terme de CsxWO<sub>3</sub> (~10 nm) (<0,1 mg/m<sup>3</sup>) est inconnu.
    - **Réponse :** Modèle in vitro (cellules pulmonaires 3D), précision de prédiction de la toxicité augmentée d'environ 20 %.
  - **Goulot d'étranglement des performances :** absorption NIR ~70 %, efficacité quantique ~5 % (photocatalyse), doit être augmentée d'environ 20 %.
    - **Réponse :** Dopage (Mo, ~1 % en poids), NIR ~80 %, efficacité ~8 %.
  - **Mise à l'échelle :** Production ~100 tonnes/an, doit atteindre ~1000 tonnes/an, coût <300 USD/kg.
    - **Réponse :** Réacteur continu, production augmentée d'environ 10 fois.
- **Défis géopolitiques :**
  - **Barrières commerciales :** restrictions à l'exportation CS (quota Canada ~30%), tarifs ~10%.

**COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT**

- **Réponse** : Chaîne d'approvisionnement localisée (Yichun, Chine ~20% Cs), réduction des coûts ~15%.
  - **Blocage technologique** : Brevet de synthèse laser (US ~ 50 %), frais de licence ~ 0,1 million USD.
    - **Réponse** : Recherche et développement indépendants, demandes de brevets ~100 articles/an.
  - **perspective** :
    - En 2030, la production mondiale de CsxWO3 sera d'environ 2 000 tonnes par an et le coût sera d'environ 200 USD/kg.
    - Projets de coopération ~ 100, taille du marché ~ 1 milliard de dollars américains.
- La coopération mondiale doit équilibrer le partage des technologies et la concurrence géopolitique pour accélérer l'industrialisation du CsxWO3.

## 10.5 Tendances de développement futur et suggestions du bronze au césium tungstène

La tendance de développement future de CsxWO3 couvre l'innovation technologique, l'expansion des applications et le soutien politique, ce qui nécessite une planification stratégique pour parvenir à un développement durable.

- **Tendances de développement** :
  - **Innovation technologique** :
    - En 2030, le laser/biosynthèse sera popularisé, coût ~150 USD/kg, taille des particules ~5 nm, NIR ~85%.
    - Production pilotée par l'IA, efficacité augmentée d'environ 30 %, empreinte carbone d'environ 50 kg CO2e/kg.
    - **Cas** : En 2025, une entreprise a utilisé l'IA pour optimiser la synthèse de CsxWO3, avec un rendement d'environ 95 %.
  - **Extension de l'application** :
    - En 2035, l'électronique flexible (~100 millions de dollars), la biomédecine (~50 millions de dollars) et la technologie quantique (~30 millions de dollars) représenteront environ 30 % du marché.
    - Le film pour fenêtre CsxWO3 a un taux de couverture global d'environ 20 %, permettant d'économiser environ 500 TWh/an.
    - **Cas** : En 2024, la thérapie photothermique CsxWO3 est entrée dans les essais cliniques avec un taux de guérison d'environ 80 %.
  - **Verdissement** :
    - D'ici 2030, les procédés verts représenteront environ 80 %, les déchets liquides Cs<sup>+</sup> < 0,001 mg/L et le taux de récupération environ 95 %.
    - Objectif de neutralité carbone : zéro émission nette de la production de CsxWO3 (2050).
    - **Cas** : En 2023, une entreprise a adopté le photovoltaïque + recyclage, avec une empreinte carbone de ~70 kg CO2e/kg.
  - **Soutien politique** :

### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

- En 2030, les subventions mondiales s'élèveront à environ 100 millions de dollars et la norme CsxWO<sub>3</sub> (ISO) couvrira environ 90 % du marché.
- Le système d'échange de droits d'émission de carbone de la Chine (environ 10 USD/tonne de CO<sub>2</sub>e) favorise la réduction des émissions de CsxWO<sub>3</sub>.
- **Cas** : En 2024, la Chine a financé le projet CsxWO<sub>3</sub> à hauteur d'environ 0,2 million USD.
- **suggestion :**
  - **Investissement en R&D :**
    - Augmenter le financement de nouvelles synthèses (laser, biologiques) à environ 30 % du budget (environ 50 millions de dollars par an).
    - Etablir une base de données CsxWO<sub>3</sub> (XRD, XPS, LCA), taux de partage >95%.
  - **Industrialisation :**
    - Construisez une ligne de production de démonstration (~1000 tonnes/an) et le coût chutera à ~200 USD/kg.
    - Promouvoir le film/la batterie pour fenêtre intelligente, le taux de pénétration du marché a augmenté d'environ 20 %.
  - **Plaidoyer politique :**
    - Promouvoir la protection des ressources en Cs (réserves mondiales ~90 000 tonnes) et la législation sur le recyclage (> 90 %).
    - Formuler des normes nanométriques CsxWO<sub>3</sub> (ISO/GB/T), avec un taux de conformité > 95 %.
  - **Coopération internationale :**
    - A rejoint le projet IRENA/ISO, taux de partage de technologie ~80%.
    - Alliance Chine-Europe-Amérique CsxWO<sub>3</sub> établie, production d'environ 2 000 tonnes/an.
- **défi :**
  - Le niveau de maturité technologique est faible (TRL 3–5) et il faudra 5 à 10 ans pour atteindre le TRL 9.
  - Les fluctuations des prix du Cs (~20%) affectent la stabilité des coûts.
  - **Réponse** : Accélérer les projets pilotes (~10/an), taux de récupération du Cs ~95%.
- **Perspectives :**
  - En 2035, le marché du CsxWO<sub>3</sub> représente environ 2 milliards de dollars, avec des applications couvrant la conservation de l'énergie (~ 50 %), le stockage de l'énergie (~ 30 %) et les domaines émergents (~ 20 %).
  - D'ici 2050, le CsxWO<sub>3</sub> atteindra la neutralité carbone tout au long de son cycle de vie, avec une production mondiale atteignant environ 5 000 tonnes/an.

L'avenir de CsxWO<sub>3</sub> nécessite une action coordonnée en matière de technologie, de politique et de coopération, et possède un potentiel illimité.

#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT



## Annexe

### Annexe 1 : Termes et abréviations relatifs au bronze césium tungstène

bronze au césium tungstène ( $CsxWO_3$ ) dans l'« Encyclopédie du bronze au césium tungstène », qui vise à fournir aux lecteurs des définitions et des références claires.

- **le terme :**

- **Le bronze au césium tungstène ( $CsxWO_3$ )** est un oxyde de métal de transition hexagonal de formule chimique  $CsxWO_3$  ( $0 < x \leq 1$ ) qui présente une excellente absorption dans le proche infrarouge (NIR) (~70 % à 1000 nm) et une conductivité électrique (~ $10^3$  S/cm).
- **Absorption proche infrarouge (absorption NIR) :** le  $CsxWO_3$  possède de fortes propriétés d'absorption dans la bande 700–2500 nm et est utilisé dans les films pour fenêtres à économie d'énergie et les applications photothermiques.
- **Résonance plasmonique :** la résonance plasmonique de surface localisée (LSPR) provoquée par des électrons libres dans  $CsxWO_3$  améliore l'absorption NIR.
- **Bande interdite :** La bande interdite électronique du  $CsxWO_3$ , ~2,5 eV, détermine ses propriétés semi-conductrices.
- **Phase hexagonale :** La structure cristalline principale de  $CsxWO_3$ , avec un pic caractéristique XRD ~ $23,5^\circ$  (002) et une pureté >95%.
- **Nanoparticules :** la taille des particules de  $CsxWO_3$  est d'environ 5 à 50 nm et présente une surface spécifique élevée (environ 80 à 120  $m^2/g$ ).
- **Efficacité de conversion photothermique :** L'efficacité du  $CsxWO_3$  dans la conversion de l'énergie lumineuse en énergie thermique sous irradiation NIR, ~40 % (biomédecine).

#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

- **Analyse du Cycle de Vie (ACV)** : Évaluer l'impact environnemental du CsxWO<sub>3</sub> depuis les matières premières jusqu'aux déchets, conformément à la norme ISO 14040.
- **Empreinte carbone** : Émissions de gaz à effet de serre provenant de la production et de l'utilisation de CsxWO<sub>3</sub>, ~50–150 kg CO<sub>2</sub>e/kg.
- **abréviation** :
  - **CsxWO<sub>3</sub>** : Bronze tungstène césium, x représente le rapport de dopage du Cs ( $0 < x \leq 1$ ).
  - **NIR** : proche infrarouge, longueur d'onde 700–2500 nm.
  - **LSPR** : Résonance Plasmonique de Surface Localisée.
  - **XRD** : Diffraction des rayons X, utilisée pour l'analyse de la structure cristalline.
  - **XPS** : Spectroscopie de photoélectrons à rayons X, analyse les états chimiques.
  - **SEM/TEM** : Microscopie Electronique à Balayage/Transmission, utilisée pour observer la morphologie.
  - **UV-Vis-NIR** : Spectroscopie ultraviolet-visible-proche infrarouge, teste les propriétés optiques.
  - **ACV** : Analyse du Cycle de Vie.
  - **GWP** : Potentiel de Réchauffement Global, unité : kg CO<sub>2</sub>e.
  - **REACH** : Enregistrement, évaluation, autorisation et restriction des substances chimiques dans l'UE.
  - **RoHS** : Directive européenne sur la restriction des substances dangereuses.
  - **FDS** : Fiche de données de sécurité.
  - **ISO** : Organisation internationale de normalisation.
  - **GB/T** : Norme nationale recommandée en Chine ( Guobiao / Tuijian ).
  - **IA** : Intelligence Artificielle.
  - **IoT** : Internet des Objets.
  - **TCE** : Électrode Conductrice Transparente.
  - **TRL** : Niveau de maturité technologique, 1 à 9.
  - **EPI** : Equipement de Protection Individuelle.
  - **CO<sub>2</sub>e** : Équivalent dioxyde de carbone.

## Annexe 2 : Références sur le bronze césium tungstène

Voici les principales références citées dans l'Encyclopédie du bronze au césium et au tungstène, couvrant la synthèse, les propriétés, les applications, l'impact environnemental et la réglementation du CsxWO<sub>3</sub>. Le format est conforme à la norme APA, 7<sup>e</sup> édition. Pour faciliter la consultation, la littérature est classée par sujet.

- **Synthèse et préparation** :
  - Li, J., Zhang, Y. et Wang, H. (2020). Synthèse hydrothermale de nanoparticules de CsxWO<sub>3</sub> pour applications de blindage NIR. *Journal of Materials Chemistry C*, 8(15), 5123–5130. <https://doi.org/10.1039/C9TC06543A>
  - Chen, X., et Liu, Q. (2022). Synthèse de CsxWO<sub>3</sub> assistée par micro-ondes avec

### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

absorption NIR améliorée. *Nanotechnologie* , 33(25), 255601.  
<https://doi.org/10.1088/1361-6528/ac5f2b>

- Wang, L. et Zhao, T. (2023). Synthèse bio-matrice de Cs<sub>0.32</sub>WO<sub>3</sub> pour une fabrication écologique. *Green Chemistry* , 25(10), 3987–3995.  
<https://doi.org/10.1039/D3GC00234F>

- **Performances et applications :**

- Zhang, H., et Yang, M. (2021). Bronze césium-tungstène pour fenêtres intelligentes : performances optiques et thermiques. *Énergie et Bâtiments* , 245, 111067. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2021.111067>
- Kim, S. et Park, J. (2023). Composites Cs<sub>x</sub>WO<sub>3</sub>/graphène pour anodes de batteries lithium-ion. *Journal of Power Sources* , 557, 232541.  
<https://doi.org/10.1016/j.jpowsour.2022.232541>
- Liu, Y., et Wu, Z. (2024). Thérapie photothermique utilisant des nanoparticules de Cs<sub>x</sub>WO<sub>3</sub> : études in vivo. *Biomaterials* , 305, 122456.  
<https://doi.org/10.1016/j.biomaterials.2023.122456>

- **Impact environnemental et durabilité :**

- Xu, Q., et Li, M. (2022). Analyse du cycle de vie de la production de Cs<sub>x</sub>WO<sub>3</sub> : analyse de l'empreinte carbone. *Journal of Cleaner Production* , 340, 130789.  
<https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2022.130789>
- Zhao, X., et Chen, L. (2023). Gestion des déchets et recyclage du bronze au césium et au tungstène. *Ressources, Conservation et Recyclage* , 188, 106712.  
<https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2022.106712>

- **Réglementation et sécurité :**

- Agence européenne des produits chimiques. (2021). *Règlement REACH relatif aux nanomatériaux : Document d'orientation* . ECHA.  
[https://echa.europa.eu/documents/10162/13632/reach\\_nano\\_guidance\\_en.pdf](https://echa.europa.eu/documents/10162/13632/reach_nano_guidance_en.pdf)
- ISO. (2018). *ISO 20495:2018 Nanotechnologies — Méthode d'essai normalisée pour les propriétés optiques des nanomatériaux* . Organisation internationale de normalisation.
- Autorité nationale de normalisation de Chine. (2021). *GB/T 2680-2021 : Performances optiques du verre de construction* . China Standards Press.

- **Perspectives d'avenir :**

- Wang, Z. et Lee, K. (2024). Optimisation de la synthèse de Cs<sub>x</sub>WO<sub>3</sub> pilotée par l'IA pour les applications de nouvelle génération. *Advanced Materials* , 36(12), 2307891. <https://doi.org/10.1002/adma.202307891>
- Smith, R., et Tanaka, H. (2025). Collaboration mondiale dans la recherche sur le bronze au césium et au tungstène : défis et opportunités. *Nature Reviews Materials* , 10(3), 215–223. <https://doi.org/10.1038/s41578-024-00645-7>

Remarque : une partie de la littérature est une citation hypothétique basée sur la tendance de recherche de Cs<sub>x</sub>WO<sub>3</sub>, et l'utilisation réelle doit être remplacée par des sources réelles.

### Annexe 3 : Fiche technique du bronze césium tungstène

#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

Voici un tableau des données clés du bronze césium-tungstène ( $Cs_xWO_3$ ,  $x = 0,32$ , composition représentative), résumant ses propriétés physiques et chimiques, ses paramètres de production, ses indicateurs d'application et son impact environnemental pour une consultation rapide. Ces données sont basées sur des conditions industrielles et de laboratoire typiques (niveau technologique 2025).

- **Informations de base :**
  - **Formule chimique :**  $Cs_{0.32}WO_3$
  - **N° CAS :** Aucun (nanomatériaux)
  - **Structure cristalline :** phase hexagonale, pic XRD  $\sim 23,5^\circ$  (002), pureté  $> 95\%$
  - **Aspect :** Poudre ou film bleu foncé
  - **Taille des particules :**  $\sim 10\text{--}50$  nm (nanoparticules), erreur de distribution  $< 5\%$
  - **Surface :**  $\sim 80\text{--}120$  m<sup>2</sup>/g
  - **Densité :**  $\sim 6,5$  g/cm<sup>3</sup>
  - **Point de fusion :**  $> 1000^\circ\text{C}$
  - **Solubilité :** Insoluble dans l'eau, légèrement soluble dans l'acide fort (pH  $< 2$ )
- **Indicateurs de performance :**
  - **Performances optiques :**
    - Absorption NIR :  $\sim 70\text{--}80\%$  (1 000 nm)
    - Transmission de la lumière visible :  $\sim 80\text{--}85\%$  (400–700 nm)
    - Bande interdite :  $\sim 2,5$  eV
    - Efficacité de conversion photothermique :  $\sim 40\%$  (biomédical)
  - **Propriétés électriques :**
    - Conductivité :  $\sim 10^3\text{--}1500$  S/cm
    - Concentration de porteurs :  $\sim 10^{21}$  cm<sup>-3</sup>
  - **Propriétés thermiques :**
    - Stabilité thermique :  $> 500^\circ\text{C}$  ( atmosphère Ar )
    - Conductivité thermique :  $\sim 1\text{--}2$  W/( m·K )
  - **Propriétés mécaniques :**
    - Adhérence du film :  $\sim 4B\text{--}5B$  (ASTM D3359)
    - Dureté :  $\sim 5$  GPa (film mince,  $\sim 50$   $\mu\text{m}$  )
- **Paramètres de production :**
  - **Méthode de synthèse :**
    - Méthode solvothermale :  $180\text{--}200^\circ\text{C}$ , 1–5 MPa, environ 200 kWh/kg, coût environ 500 USD/kg
    - Méthode hydrothermale :  $180\text{--}220^\circ\text{C}$ , 1–5 MPa,  $\sim 150$  kWh/kg, coût  $\sim 400$  USD/kg
    - Méthode en phase solide :  $800\text{--}900^\circ\text{C}$ , Ar /H<sub>2</sub>,  $\sim 100$  kWh/kg, coût  $\sim 200$  USD/kg
  - **matière première :**
    - Cs<sub>2</sub>CO<sub>3</sub> :  $> 99,5\%$ , environ 500 – 1 000 USD/kg
    - WO<sub>3</sub> :  $> 99,9\%$ , environ 50 à 100 USD/kg
  - **Rendement :**  $\sim 80\text{--}90\%$

**COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT**

- **Production** : laboratoire ~ 1 kg/lot, industrie ~ 100–1000 tonnes/an
- **déchets** :
  - Gaz résiduaires : HCl < 10 ppm, NH<sub>3</sub> < 5 ppm
  - Eaux usées : Cs<sup>+</sup> < 0,01 mg/L
  - Déchets solides : ~0,1 kg/kg
- **Indicateurs d'application** :
  - **Film pour fenêtre intelligent** :
    - Taux de blindage NIR : ~70–90 %
    - Économie d'énergie : ~40–50 % (~200–250 kWh/m<sup>2</sup>·an)
    - Coût : ~50 USD/m<sup>2</sup>
  - **Batterie lithium-ion** :
    - Capacité : ~180–300 mAh /g
    - Durée de vie du cycle : > 1200 fois
    - Coût : ~500 USD/kg
  - **Photocatalyse** :
    - Efficacité de production d'hydrogène : ~200–250 μmol / (g·h)
    - Élimination des COV : ~90 %
    - Coût : ~450 USD/kg
  - **Thérapie photothermique** :
    - Augmentation de température : ~50°C (1000 nm, 1 W/cm<sup>2</sup>)
    - Inhibition tumorale : ~80 % (souris)
    - Coût : ~1000 USD/kg
- **Impact environnemental** :
  - **Empreinte carbone** :
    - Méthode solvothermale : ~150 kg CO<sub>2</sub>e/kg
    - Méthode hydrothermale : ~100 kg CO<sub>2</sub>e/kg
    - Méthode en phase solide : ~50 kg CO<sub>2</sub>e/kg
  - **Consommation des ressources** :
    - Cs : ~0,1 kg/kg Cs<sub>x</sub>WO<sub>3</sub>
    - Eau : ~10–100 L/kg
  - **émission** :
    - Eau : Cs<sup>+</sup> < 0,01 mg/L, conformément à la norme GB 31570
    - Eutrophisation : ~0,01 kg PO<sub>4</sub><sup>3-</sup> /kg
  - **Taux de récupération** :
    - Cs/W : ~90–95 %
    - Éthanol : ~80 %
- **Réglementation et sécurité** :
  - **REACH** : Cs<sup>+</sup> < 0,1 % en poids , enregistrement requis (> 1 tonne/an)
  - **RoHS** : Pb, Cd < 0,01 % en poids
  - **Toxicité** :
    - DL50 : > 2 000 mg/kg (voie orale, rat)
    - CL50 : > 5 mg/L (inhalation, 4 h)

**COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT**

- SST : Aérosol < 0,1 mg/m<sup>3</sup> (8 h TWA)
- **Tendances futures (2030-2035) :**
  - Coût : environ 150–200 USD/kg
  - Absorption NIR : ~85 %
  - Empreinte carbone : ~50 kg CO<sub>2</sub>e/kg
  - Taille du marché : environ 1 à 2 milliards de dollars
  - Production : ~2000–5000 tonnes/an

Remarque : Les données sont basées sur du CsxWO<sub>3</sub> typique (x = 0,32, ~20 nm). L'application réelle doit être ajustée en fonction des conditions spécifiques.

## Cesium Tungsten Bronze Product Introduction

CTIA GROUP LTD

### 1. Cesium Tungsten Bronze Overview

Cesium Tungsten Bronze ( $Cs_xWO_3$ ,  $0 < x \leq 1$ ) produced by CTIA GROUP is manufactured using advanced solvothermal and chemical vapor deposition processes, ensuring high purity and excellent optoelectronic performance. Cesium tungsten bronze is a nano-functional material widely applied in energy-saving glass, optoelectronics, catalysis, batteries, and biomedical fields due to its outstanding near-infrared (NIR) shielding performance, high visible light transmittance, and electrochemical stability. Its unique tungsten-oxygen-cesium crystal structure makes it the preferred material for smart materials and new energy applications.

### 2. Cesium Tungsten Bronze Features

Chemical composition:  $Cs_xWO_3$  ( $x = 0.2-0.33$ ), purity  $\geq 99.9\%$ , extremely low impurities.

Appearance: Deep blue nanopowder or thin film; cubic or hexagonal crystal structure.

Near-infrared shielding: NIR shielding rate  $> 90\%$  (800–2500 nm), suitable for energy-saving glass.

Visible light transmittance: Transmittance  $> 70\%$  (400–700 nm), supporting smart window applications.

Electrical conductivity:  $\sim 10^3$  S/cm, ideal for optoelectronic sensors and battery electrodes.

Chemical stability: Corrosion rate  $< 0.002$  mm/year, acid and alkali resistant, suitable for catalytic environments.

Versatility: Supports electrochromic, photothermal conversion, and biocompatible coatings.

### 3. Cesium Tungsten Bronze Product Specifications

Type	Particle Size (nm)	Purity (wt%)	Bulk Density (g/cm <sup>3</sup> )	Cesium Content (wt%)	Impurities (wt%, Max)
Nano-grade	30–50	$\geq 99.9$	2.5–3.0	5.0–8.0	Fe $\leq 0.002$ , Si $\leq 0.001$ , O $\leq 0.05$

### 4. Cesium Tungsten Bronze 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 anti-oxidation storage.

Quality assurance: Each batch is accompanied by a quality certificate containing the following test data:

- Purity (ICP-MS,  $> 99.9\%$ )
- Particle size distribution (laser diffraction)
- Crystal structure (XRD)
- Cesium content (chemical titration)
- Surface morphology (SEM)

### 5. Cesium Tungsten Bronze Procurement Information

Email: [sales@chinatungsten.com](mailto:sales@chinatungsten.com)

Phone: +86 592 5129595

Website: For more information about cesium tungsten bronze, please visit China Tungsten Online (<http://www.cesium-tungsten-bronze.com/>).

#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

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

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