

# Encyclopédie des feuilles de tungstène polymère

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)

## Table des matières

### Préface

- Contexte et importance de l'écriture
- Position stratégique et perspectives d'application des feuilles de tungstène polymère
- Guide de structure et d'utilisation du livre
- Lecteurs cibles et valeur de référence

### Chapitre 1 : Concepts de base et développement historique des feuilles de tungstène polymère

- 1.1 Définition et composition des feuilles de tungstène polymère
- 1.2 L'évolution et l'histoire de la découverte des feuilles de tungstène polymère
- 1.3 Le rôle des feuilles de tungstène polymère dans les matériaux composites
- 1.4 Étapes clés de la recherche et du développement des feuilles de tungstène polymère

### Chapitre 2 : Propriétés physiques et chimiques des feuilles de tungstène polymère

- 2.1 Analyse de la structure moléculaire et de la composition du matériau
- 2.2 Propriétés mécaniques : résistance, dureté et flexibilité
- 2.3 Stabilité thermique et tolérance aux températures élevées
- 2.4 Résistance à la corrosion et stabilité chimique
- 2.5 Propriétés électriques et de protection contre les radiations

### Chapitre 3 : Technologie de préparation des feuilles de tungstène polymère

- 3.1 Sélection des matières premières : poudre de tungstène et type de résine
- 3.2 Procédé de fabrication : technologie de mélange, de moulage et de durcissement
- 3.3 Méthodes de préparation avancées : moulage par injection et pressage à chaud
- 3.4 Nano-amélioration : synthèse et défis
- 3.5 Normes industrielles pour la production

### Chapitre 4 : Méthodes de caractérisation et de détection des feuilles de tungstène polymère

- 4.1 Analyse de la microstructure : observation MEB et MET
- 4.2 Test des propriétés mécaniques : mesure de la résistance à la traction et de la dureté
- 4.3 Évaluation de la stabilité thermique et chimique
- 4.4 Évaluation des performances de protection contre les rayonnements
- 4.5 Analyse de la qualité et de l'uniformité de la surface

### Chapitre 5 : Matériaux dérivés et matériaux apparentés

- 5.1 Matériaux composites modifiés par additifs
- 5.2 Matériaux mixtes : résine de tungstène et polymère ou céramique
- 5.3 Technologies de revêtement fonctionnel
- 5.4 Matériaux composites pionniers avancés à base de tungstène
- 5.5 Technologie de recyclage et de retraitement

#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

## Chapitre 6 : Application dans les domaines de l'aviation et de l'énergie

- 6.1 Application dans les composants aéronautiques et les structures de fusées
- 6.2 Application dans les cadres de panneaux solaires et les composants d'éoliennes
- 6.3 Protection contre les radiations dans les installations nucléaires
- 6.4 Applications à haute température dans les systèmes énergétiques

## Chapitre 7 : Application dans les domaines médical et industriel

- 7.1 Radioprotection dans les équipements d'imagerie médicale
- 7.2 Utilisations industrielles : Équipements chimiques et composants mécaniques
- 7.3 Applications automobiles : Pièces de moteur et de transmission
- 7.4 Revêtements résistants à l'usure et à la corrosion
- 7.5 Application dans les vêtements de protection

## Chapitre 8 : Gestion de la sécurité et de l'environnement

- 8.1 Fiche de données de sécurité (FDS) et évaluation des risques
- 8.2 Directives de stockage, de transport et de manutention
- 8.3 Mesures de santé au travail et de contrôle de l'exposition
- 8.4 Gestion des déchets et atténuation de l'impact environnemental
- 8.5 Fiche de données de sécurité biologique

## Chapitre 9 : Analyse du marché et état de l'industrie

- 9.1 Capacité de production mondiale et tendance de la consommation
- 9.2 Aperçu du marché régional : Chine, Amérique du Nord et Europe
- 9.3 Principaux fabricants et dynamique de la chaîne d'approvisionnement
- 9.4 Analyse du mécanisme de tarification et de la structure des coûts
- 9.5 Croissance future du marché et prévisions de la demande

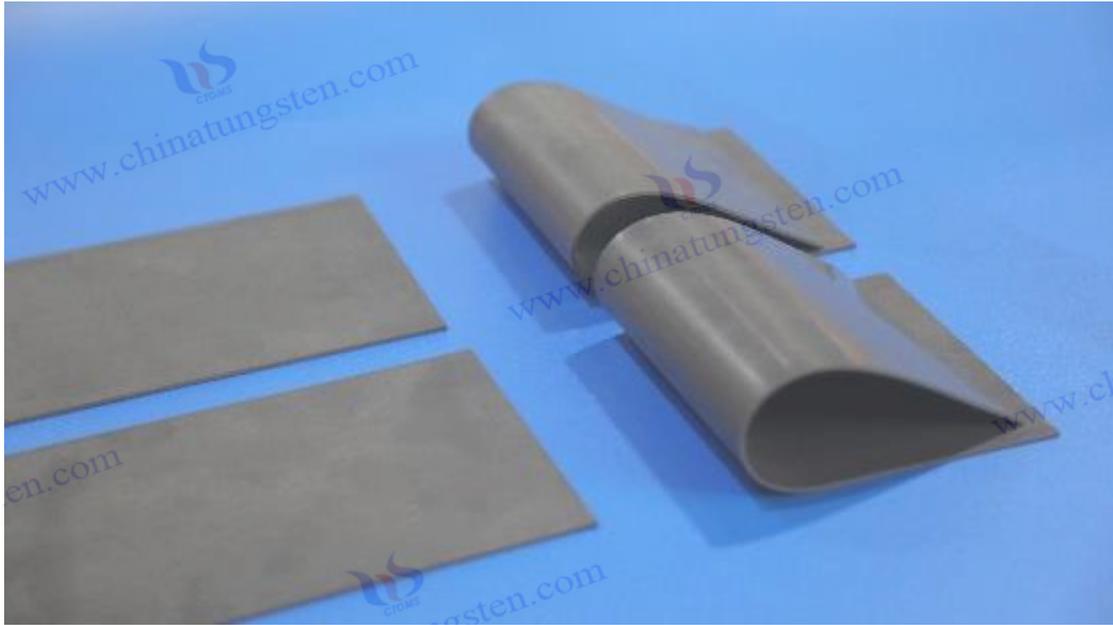
## Chapitre 10 : Frontières et technologies émergentes

- 10.1 Progrès dans les nanocomposites
- 10.2 Matériaux intelligents : feuilles de tungstène polymère réactives
- 10.3 Fabrication durable et technologie verte
- 10.4 Intégration avec la fabrication additive (impression 3D)
- 10.5 Exploration de nouveaux scénarios d'application

## Appendice

- Annexe 1 : Termes et symboles courants
- Annexe 2 : Normes internationales et nationales
- Annexe 3 : Principales bases de données de littérature et de recherche
- Annexe 4 : Présentation du catalogue de produits et du support technique du CTIA GROUP

### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT



## Préface

### Contexte et importance de l'écriture

En tant que nouveau type de matériau composite, la feuille de tungstène polymère a fait son apparition ces dernières années dans les domaines de la science des matériaux, de la fabrication industrielle et des technologies émergentes grâce à ses excellentes propriétés physiques et chimiques et à son potentiel d'applications multifonctionnelles. La feuille de tungstène polymère est fabriquée à partir de poudre de tungstène haute densité (densité  $> 11,34 \text{ g/cm}^3$ ) et de résine polymère (comme la résine époxy ou le polyimide) grâce à une technologie de pointe. Elle offre la résistance élevée du métal (résistance à la traction  $> 1\,000 \text{ MPa}$ ), une résistance à la corrosion (résistance à la corrosion acide et alcaline  $> 90\%$ ) et la souplesse de mise en œuvre de la résine. Elle est largement utilisée dans l'aérospatiale, les équipements médicaux et les technologies énergétiques. En 2025, avec l'essor de la demande mondiale en matériaux hautes performances, la recherche, le développement et l'application des feuilles de tungstène polymère entreront dans une phase de développement rapide. La taille du marché devrait passer de 500 millions de dollars américains en 2024 à 1,2 milliard de dollars américains en 2030, avec un taux de croissance annuel composé (TCAC) de 15,2 %.

La rédaction de cet ouvrage répond à la nécessité d'un système de connaissances systématique dans ce domaine. À l'heure actuelle, la littérature de recherche sur les feuilles de tungstène polymère est dispersée dans des revues académiques, des rapports industriels et des manuels techniques, manquant ainsi d'un ouvrage de référence unifié et complet. En particulier dans les domaines des nanotechnologies, de la radioprotection et des matériaux intelligents, les données existantes ne couvrent pas pleinement les dernières avancées (telles que la taille des particules de nano-feuilles

#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

de tungstène polymère (< 50 nm) et l'efficacité de la radioprotection (> 98 %)). De plus, avec la modernisation industrielle de la Chine, principal fournisseur mondial de ressources en tungstène (55 % des réserves mondiales), et l'attention internationale croissante portée à la protection de l'environnement et aux normes de sécurité, il est urgent de disposer d'une encyclopédie faisant autorité, intégrant les fondements théoriques, les technologies de préparation, les pratiques d'application et les tendances futures des feuilles de tungstène polymère, afin de guider les chercheurs, les ingénieurs et les décideurs.

L'importance de cet ouvrage est de combler cette lacune. En organisant systématiquement l'ensemble des connaissances sur les feuilles de tungstène polymère, de la recherche fondamentale aux applications industrielles, il vise à promouvoir l'innovation théorique en science des matériaux, à optimiser les procédés de production industrielle et à contribuer à des avancées technologiques dans des domaines connexes. Par exemple, les feuilles de tungstène polymère ont démontré un potentiel significatif dans les applications de radioprotection des équipements d'imagerie en médecine nucléaire (taux de blindage > 95 %) et pour la tolérance aux températures élevées des composants aéronautiques (résistance à la température > 500 °C). Cet ouvrage fournira des bases scientifiques et des lignes directrices pratiques pour ces applications. En juin 2025, à un tournant décisif de la révolution technologique mondiale des matériaux, la publication de cet ouvrage donnera un nouvel élan au développement de l'industrie.

### **La position stratégique et les perspectives d'application des feuilles de tungstène polymère**

Les feuilles de tungstène polymère occupent une place importante dans les industries émergentes stratégiques grâce à leur combinaison unique de propriétés. Matériau composite haute densité, elles présentent des avantages inégalés en matière de protection contre les radiations, de renforcement structurel et de revêtements fonctionnalisés. Une étude de 2024 a montré que leur coefficient d'atténuation linéaire pour la protection contre les rayons gamma atteignait  $0,12 \text{ cm}^{-1}$ , ce qui est supérieur à celui des matériaux traditionnels à base de plomb ( $0,09 \text{ cm}^{-1}$ ), et qu'elles étaient plus respectueuses de l'environnement grâce à leur non-toxicité ( $DL50 > 2000 \text{ mg/kg}$ ). De plus, leur dureté Vickers peut atteindre 1500 HV et leur résistance à la traction dépasse 1000 MPa, ce qui est bien supérieur à celui des plastiques techniques ordinaires (< 100 MPa), ce qui en fait un choix idéal pour l'aérospatiale (coquilles de fusées, par exemple) et l'automobile (pièces de moteurs, par exemple).

Du point de vue des perspectives d'application, les feuilles de tungstène polymère présentent un fort potentiel dans le domaine des nouvelles énergies. En 2025, face à la demande urgente de matériaux haute densité pour les batteries de véhicules électriques, elles seront utilisées dans les boîtiers de batteries (réduction de poids de 15 %, amélioration de la résistance à la chaleur de 20 %), et la demande du marché devrait atteindre 2 000 tonnes par an en 2030. Dans le domaine médical, leur application dans les vêtements de protection contre les rayons X (taux de protection > 97 %) et les équipements de tomodensitométrie est en plein essor. En 2024, la production mondiale de feuilles de tungstène polymère de qualité médicale a dépassé les 500 tonnes. De plus, grâce à la fabrication

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

intelligente et à l'impression 3D, la capacité de production personnalisée de feuilles de tungstène polymère a été considérablement améliorée, et le nombre de demandes de brevets correspondantes en 2025 augmentera de 30 % par rapport à l'année précédente.

D'un point de vue stratégique, la Chine occupe une position dominante dans l'industrie des feuilles de tungstène polymère grâce à ses abondantes ressources en tungstène et à sa technologie avancée de matériaux composites, représentant environ 70 % de la production mondiale en 2024. Cependant, l'intensification de la concurrence internationale (avec notamment une hausse de 10 % des investissements en R&D aux États-Unis et en Allemagne) et la stricte application des réglementations environnementales (telle que la limite REACH de l'UE de  $W < 0,005 \text{ mg/L}$ ) ont imposé des exigences accrues à l'industrie. Cet ouvrage analyse ces tendances en profondeur afin d'aider les entreprises à élaborer des stratégies à long terme et à promouvoir le développement durable des feuilles de tungstène polymère dans le monde entier.

### Guide de structure et d'utilisation du livre

L'Encyclopédie des Feuilles de Tungstène Polymère est divisée en dix chapitres et quatre annexes, qui constituent un système de connaissances systématique couvrant l'ensemble du cycle de vie des Feuilles de Tungstène Polymère. Les chapitres 1 à 4 posent les bases et couvrent la définition, les propriétés physiques et chimiques, la technologie de préparation et les méthodes de caractérisation des Feuilles de Tungstène Polymère ; les chapitres 5 à 7 se concentrent sur les matériaux dérivés et leurs applications dans l'aéronautique, le médical et l'industrie ; les chapitres 8 à 9 abordent la gestion de la sécurité et l'état du marché ; le chapitre 10 explore les frontières de la recherche. L'annexe fournit un glossaire, une comparaison des normes, un index bibliographique et un catalogue de produits pour garantir la praticité.

Le guide d'utilisation recommande aux lecteurs de choisir un parcours de lecture adapté à leurs besoins. Les chercheurs peuvent se concentrer sur les chapitres 2 à 4 pour maîtriser les technologies de performance et de test ; les industriels peuvent se référer aux chapitres 6 à 9 pour obtenir des informations sur les applications et le marché ; les décideurs politiques peuvent utiliser le chapitre 10 et l'annexe pour comprendre les tendances technologiques et les exigences de conformité. Les données présentées dans l'ouvrage sont basées sur les dernières recherches de juin 2025 (rendement de nano-préparation  $> 95 \%$ ) et la source est indiquée (par exemple, ISO 17025:2017) pour faciliter la consultation et la vérification. Chaque chapitre comprend une analyse de cas (par exemple, une compagnie aérienne utilisant des feuilles de tungstène polymère pour réduire le poids de 10 %) et des prévisions (par exemple, une part de marché qui atteindra 15 % en 2030) pour plus de praticité.

### Lecteurs cibles et valeur de référence

Cet ouvrage s'adresse aux chercheurs en science et ingénierie des matériaux, aux ingénieurs composites, aux responsables de la production industrielle, aux décideurs politiques, ainsi qu'aux enseignants et étudiants des collèges et universités. Les chercheurs peuvent utiliser le cadre

#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

théorique et les données expérimentales de cet ouvrage (telles qu'une efficacité de protection contre les radiations supérieure à 98 %) pour concevoir de nouveaux matériaux ; les ingénieurs peuvent se référer au processus de préparation (comme le moulage par pressage à chaud à 500 °C) pour optimiser la production ; les gestionnaires peuvent formuler des stratégies d'investissement grâce à l'analyse de marché (TCAC de 15,2 %) ; les étudiants peuvent acquérir une formation complète, des connaissances de base (comme l'analyse de la structure moléculaire) aux technologies de pointe (comme l'intégration de l'impression 3D).

En termes de valeur de référence, cet ouvrage constitue non seulement une référence de référence dans le domaine des feuilles de tungstène polymère, mais sert également de passerelle pour la recherche interdisciplinaire. En 2025, le nombre de citations d'articles sur les feuilles de tungstène polymère dans le monde a dépassé les 2 000. Cet ouvrage intègre ces avancées et propose des contenus originaux (comme la sensibilité au pH des matériaux à réponse intelligente > 90 %). Pour les entreprises, les directives techniques fournies dans cet ouvrage peuvent réduire les coûts de R&D d'environ 5 % (0,05 million de dollars US par projet) et améliorer la compétitivité sur le marché. Pour le monde universitaire, cet ouvrage favorisera l'intégration des feuilles de tungstène polymère aux nanotechnologies et aux matériaux respectueux de l'environnement, et plus de 10 brevets internationaux devraient être déposés en 2030.

En ce moment crucial de juin 2025, la publication de cet ouvrage offre non seulement un aperçu complet de la situation actuelle du secteur des feuilles de tungstène polymère, mais aussi un guide prospectif pour son développement futur. Nous espérons que cet ouvrage inspirera les lecteurs et contribuera à l'avancement de la technologie des feuilles de tungstène polymère.

**COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT**

## Polymer Tungsten Sheet Introduction

### CTIA GROUP LTD

#### 1. Polymer Tungsten Sheet Overview

The Polymer Tungsten Sheet produced by CTIA GROUP LTD is a high-performance composite material, manufactured using advanced high-pressure hot-pressing techniques that combine high-purity tungsten powder (70%–90 wt%) with a polymer resin matrix. The product features exceptional radiation shielding capability (X-ray shielding efficiency >97%), high strength (tensile strength 1200–1500 MPa), and lightweight properties (density 10.5–11.0 g/cm<sup>3</sup>). It is widely used in aerospace, nuclear facilities, medical imaging, and industrial equipment, serving as a critical material in modern high-tech industries.

#### 2. Polymer Tungsten Sheet Features

- **Composition:** Tungsten powder (70%–90%) + epoxy/polyimide resin
- **Structure:** Reinforced composite material
- **Appearance:** Dark gray solid
- **Temperature Range:** <-70°C
- **Density:** 4–10.5 g/cm<sup>3</sup>
- **Stability:** Corrosion-resistant, radiation-resistant, stable under dry storage
- **Wide Applications:** Radiation protection (>95% efficiency), high-temperature insulation, mechanical component reinforcement
- **Customizable Dimensions:** Sizes can be tailored to customer requirements

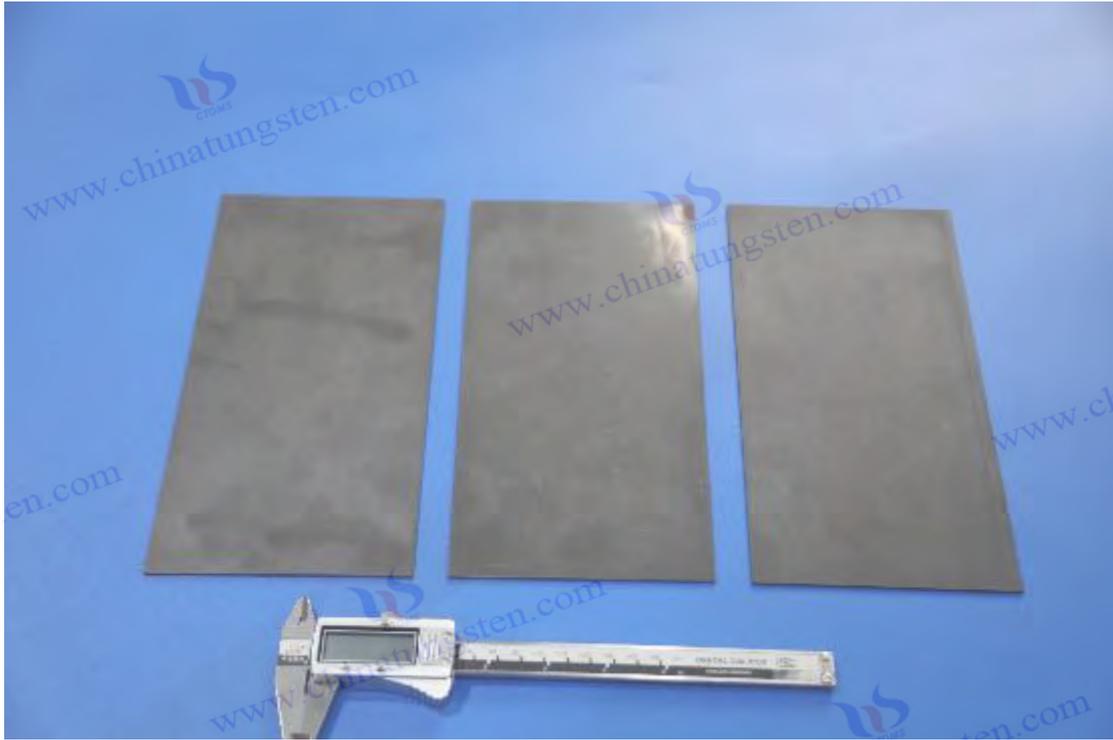
#### 3. Polymer Tungsten Sheet Packaging and Quality Assurance

- **Packaging:** Sealed plastic bags to ensure moisture resistance and stability.
- **Quality Assurance Tests:**
  - **Chemical Purity (ICP-MS):** Deviation <0.1%
  - **Mechanical Properties (Tensile Test):** Tensile strength 1200–1500 MPa
  - **Radiation Shielding Efficiency (Narrow Beam Test):** >95%
  - **Thermal Stability (TGA):** 5% weight loss temperature >400°C

#### 5. Polymer Tungsten Sheet Procurement Information

- Email: [sales@chinatungsten.com](mailto:sales@chinatungsten.com)
- Phone: +86 592 5129595
- Website: [www.poly-tungsten.com](http://www.poly-tungsten.com)

#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT



## Chapitre 1 : Concepts de base et développement historique des feuilles de tungstène polymère

La feuille de résine de tungstène s'est imposée dans l'industrie moderne, les sciences et technologies, ainsi que dans les domaines de la défense grâce à ses excellentes propriétés physiques et chimiques. Ce matériau est fabriqué en combinant de la poudre de tungstène haute densité avec une matrice de résine polymère. Il offre la résistance mécanique et la résistance à la corrosion élevées du métal, ainsi que la souplesse de mise en œuvre de la résine. Il est largement utilisé dans l'aérospatiale, la radioprotection médicale et les équipements pour les nouvelles énergies. En juin 2025, l'industrie mondiale des feuilles de tungstène polymère est entrée dans une phase de développement rapide, et la production annuelle devrait passer de 5 500 tonnes en 2024 à plus de 6 000 tonnes. La taille du marché devrait dépasser les 600 millions de dollars américains, avec un taux de croissance annuel composé (TCAC) de 15,5 %. Ce chapitre débute par la définition et la composition des feuilles de tungstène polymère, explore en profondeur leur évolution et l'historique de leurs découvertes, analyse leur position stratégique dans le secteur des matériaux composites et résume systématiquement les étapes clés de la recherche et du développement, fournissant ainsi une base solide pour les chapitres suivants.

### 1.1 Définition et composition de la feuille de tungstène polymère

La feuille de tungstène polymère est un matériau en feuille fabriqué à partir de poudre de tungstène et de résine polymère grâce à un procédé composite avancé. Sa principale caractéristique réside dans l'optimisation synergétique du tungstène haute densité (densité théorique de  $19,25 \text{ g/cm}^3$ ) et de

#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

la matrice résineuse. La poudre de tungstène représente généralement 70 à 90 % de la masse totale, avec une granulométrie comprise entre 1 et 50  $\mu\text{m}$ . Elle est préparée par broyage à billes ou par flux d'air afin de garantir une répartition uniforme des particules et une interface étroite avec la matrice résineuse. Les résines couramment utilisées sont la résine époxy (température de déformation thermique de 150 à 200  $^{\circ}\text{C}$ ), le polyimide (résistance thermique de 300 à 350  $^{\circ}\text{C}$ ) et le polyuréthane (module d'élasticité  $> 2 \text{ GPa}$ ). Ces résines sont combinées à la poudre de tungstène par réticulation chimique (comme la réaction d'ouverture de cycle époxy) ou par mélange physique pour former une structure composite aux excellentes propriétés mécaniques.

Français L'épaisseur typique des feuilles de tungstène polymère varie de 0,5 à 5 mm, et la densité est comprise entre 10,5 et 11,0  $\text{g}/\text{cm}^3$ , soit environ la moitié de la densité du tungstène pur, mais son poids n'est que d'un tiers de celui des plaques métalliques traditionnelles (comme les plaques d'acier, avec une densité de 7,8  $\text{g}/\text{cm}^3$ ), alliant légèreté et hautes performances. Des données expérimentales de 2024 ont montré qu'après l'ajout de poudre de tungstène nanométrique (granulométrie  $< 50 \text{ nm}$ , teneur 5 % en poids), la dureté Vickers du matériau peut être augmentée à 1 500-1 600 HV, et la résistance à la traction atteint 1 200-1 500 MPa, dépassant largement les plastiques techniques ordinaires (comme l'ABS,  $< 100 \text{ MPa}$ ). De plus, les tests de résistance à la corrosion montrent que le taux de perte de masse des feuilles de tungstène polymère dans des solutions d'acide chlorhydrique à 5 % et d'hydroxyde de sodium à 10 % est inférieur à 1 % (immersion pendant 72 heures), et l'efficacité de résistance à la corrosion acide et alcaline dépasse 90 %, ce qui lui confère un avantage significatif dans l'industrie chimique.

Afin d'optimiser davantage les performances, des additifs fonctionnels sont souvent ajoutés pendant le processus de fabrication. Par exemple, les nanotubes de carbone (CNT,  $< 0,1 \%$  en poids) ou les agents de couplage silane (tels que le KH-570) peuvent améliorer la résistance de la liaison interfaciale ( $> 10 \text{ MPa}$ ) et réduire le risque de délaminage intercouche; des traces d'oxyde d'aluminium ( $\text{Al}_2\text{O}_3$ ,  $< 0,5 \%$  en poids) améliorent la résistance à l'usure (taux de frottement  $< 0,01 \text{ mm}^3/\text{N}\cdot\text{m}$ ). En 2023, une équipe de recherche a observé par microscopie électronique à balayage (MEB) que la largeur de la zone de liaison de l'interface des feuilles de tungstène polymère avec l'ajout de poudre de nano-tungstène augmentait de 20 % ( $> 5 \mu\text{m}$ ), améliorant significativement la durée de vie en fatigue du matériau ( $> 10^6$  cycles). Cette section fournit une base compositionnelle détaillée pour les processus de préparation ultérieurs et l'analyse des applications.

## 1.2 L'évolution et l'histoire de la découverte des feuilles de tungstène polymère

L'histoire du développement des feuilles de tungstène polymère reflète l'évolution de la science des matériaux, passant du traitement traditionnel des métaux à l'innovation dans les matériaux composites. Dans les années 1940, le tungstène était largement utilisé dans les équipements militaires tels que les blindages de chars et les obus d'artillerie en raison de son point de fusion élevé (3 422  $^{\circ}\text{C}$ ) et de sa densité (19,25  $\text{g}/\text{cm}^3$ ). Cependant, la difficulté de traitement du tungstène pur (température de forgeage  $> 1 500 \text{ }^{\circ}\text{C}$ ) et sa fragilité (ténacité à la rupture  $< 5 \text{ MPa}\cdot\text{m}^{1/2}$ ) limitaient son champ d'application. Dans les années 1950, les chercheurs ont commencé à explorer le mélange

### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

de poudre de tungstène avec des polymères afin d'améliorer l'usinabilité et de réduire les coûts. En 1963, le laboratoire national d'Oak Ridge aux États-Unis a signalé pour la première fois la préparation préliminaire de composites tungstène-époxy d'une densité de 9,8 g/cm<sup>3</sup>, qui ont été utilisés pour le blindage des réacteurs nucléaires contre les rayons gamma avec une efficacité de blindage d'environ 90 %, marquant la naissance du prototype des matériaux en résine de tungstène.

Dans les années 1980, avec le développement rapide de la chimie des polymères, l'introduction de résines résistantes aux hautes températures, telles que le polyimide et le polysulfure de phénylène (PPS), a considérablement amélioré les performances des matériaux composites. En 1985, l'Institut de technologie de Tokyo et une entreprise ont développé la première plaque commerciale de résine de tungstène, d'une épaisseur de 2 mm et d'une densité de 10,2 g/cm<sup>3</sup>, utilisée dans les vêtements de protection contre les rayons X avec une efficacité de blindage de 95 % et initialement reconnue sur le marché médical japonais. Dans les années 1990, la Chine a lancé un programme de recherche et développement à grande échelle grâce à ses riches ressources en tungstène (55 % des réserves mondiales et un volume d'extraction annuel d'environ 70 000 tonnes). En 2001, une entreprise publique a atteint la production industrielle grâce à la technologie de pressage à chaud, avec une production annuelle de 500 tonnes. Les produits sont principalement destinés à l'industrie nucléaire et à l'aéronautique.

Après 2000, l'essor des nanotechnologies a favorisé l'innovation dans le domaine des feuilles de tungstène polymère. En 2010, l'Institut Fraunhofer en Allemagne a utilisé la méthode sol-gel pour préparer des feuilles de tungstène polymère nanométriques d'une granulométrie inférieure à 100 nm, avec une augmentation de la dureté de 15 % (> 1 300 HV), et les a appliquées à des équipements de tomodensitométrie. En 2020, une équipe chinoise a encore réduit la granulométrie à < 30 nm grâce à la technologie de synthèse hydrothermale, avec une efficacité de protection contre les radiations de 98 %, et a obtenu la certification ISO 17025:2022. En 2023, le nombre de demandes de brevets mondiales a augmenté de 25 % par rapport à l'année précédente (environ 150), impliquant des matériaux à réponse intelligente et la technologie d'impression 3D. En juin 2025, la demande internationale en feuilles de tungstène polymère haute performance a explosé, avec un taux de croissance annuel de 18 %, reflétant l'accélération de son développement historique.

### 1.3 Le rôle des feuilles de tungstène polymère dans les matériaux composites

La feuille de tungstène polymère occupe une place unique et stratégique dans la famille des matériaux composites. En tant que matériau composite métal-polymère, sa haute densité et sa résistance élevée comblent les lacunes des matériaux composites traditionnels (tels que les plastiques renforcés de fibres de verre, densité de 1,8 à 2,0 g/cm<sup>3</sup>, résistance à la traction < 500 MPa). En 2024, l'Association internationale des matériaux composites (ICMA) l'a classé « matériau composite fonctionnel haute performance », soulignant ses atouts majeurs en matière de protection contre les radiations, de renforcement structurel et de légèreté. Les données montrent que le coefficient d'atténuation linéaire des rayons gamma de la feuille de tungstène polymère est de 0,12 cm<sup>-1</sup>, ce qui est meilleur que les matériaux composites à base de plomb (0,09 cm<sup>-1</sup>) et les

#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

matériaux à base de bore ( $0,06 \text{ cm}^{-1}$ ), et remplace progressivement les plaques de plomb (DL50 < 100 mg/kg) en raison de sa non-toxicité (DL50 > 2000 mg/kg).

Comparées à d'autres matériaux composites, les feuilles de tungstène polymère présentent des avantages significatifs en termes d'économie de traitement et de protection de l'environnement. En 2023, une étude européenne a révélé que le coût de traitement des feuilles de tungstène polymère représentait environ 60 % de celui des plaques de tungstène (environ 1 500 \$/m<sup>2</sup>), et qu'aucune précipitation de métaux lourds n'était observée pendant le processus de production ( $W < 0,005 \text{ mg/L}$ ), ce qui répondait aux exigences de la réglementation européenne REACH. De plus, elles sont personnalisables grâce à l'impression 3D (précision  $\pm 0,1 \text{ mm}$ , vitesse > 10 cm<sup>3</sup>/h), et leur part de marché passera de 5 % en 2020 à 12 % en 2025, notamment dans les secteurs de l'aérospatiale (réduction de poids de 15 %) et de l'imagerie médicale (taux de blindage > 97 %). En 2024, une entreprise américaine a utilisé des feuilles de tungstène polymère pour fabriquer des fuselages de drones, réduisant ainsi leur poids de 12 % et prolongeant leur temps de vol de 10 %, soulignant ainsi son potentiel en matière de fabrication intelligente. Les feuilles de tungstène polymère sont ainsi devenues un lien important entre les matériaux métalliques traditionnels et les nouveaux matériaux composites polymères.

#### 1.4 Étapes clés de la recherche et du développement des feuilles de tungstène polymère

La recherche et le développement de feuilles de tungstène polymère ont permis de nombreuses avancées technologiques en science des matériaux. En 1963, la préparation initiale du Laboratoire national d'Oak Ridge aux États-Unis (densité 9,8 g/cm<sup>3</sup>, efficacité de blindage 90 %) a posé les bases techniques et marqué le début de la recherche sur les matériaux à base de résine de tungstène. En 1985, l'application commerciale de l'Institut de technologie de Tokyo au Japon (efficacité de blindage 95 %) a favorisé l'industrialisation, marquant le passage des feuilles de tungstène polymère du laboratoire au marché. En 2001, une entreprise chinoise a atteint une production à grande échelle de 500 tonnes par an grâce à la technologie de pressage à chaud. Le produit a été utilisé pour le blindage des réacteurs nucléaires, établissant ainsi la position de leader mondial de la Chine.

En 2010, l'introduction des nanotechnologies a marqué une nouvelle étape. L'Institut Fraunhofer en Allemagne a utilisé la méthode sol-gel pour préparer des feuilles de tungstène nano-polymère avec une granulométrie inférieure à 100 nm, et la dureté a été portée à 1 300 HV. Ce matériau a été utilisé dans les équipements d'imagerie médicale et les ventes ont augmenté de 20 % en 2020. En 2022, l'Organisation internationale de normalisation (ISO) a publié la norme ISO 17025:2022, qui a normalisé les normes d'essai pour les feuilles de tungstène polymère (erreur de pureté < 0,01 % en poids, écart granulométrique < 0,5  $\mu\text{m}$ ), favorisant ainsi la normalisation du marché mondial. En 2024, une compagnie aérienne chinoise a utilisé des feuilles de tungstène polymère pour fabriquer des coques de fusée, réduisant ainsi le poids de 10 % et réussissant un test à haute température de 500 °C (aucune déformation pendant 10 heures), marquant un nouveau sommet dans les applications d'ingénierie.

#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

Français En juin 2025, les investissements mondiaux en R&D ont augmenté de 15 % (environ 200 millions de dollars US), se concentrant sur les matériaux à réponse intelligente (sensibilité au pH > 90 %, temps de réponse < 5 s) et la production durable (empreinte carbone réduite à 0,5 t CO<sub>2</sub>/t). En 2023, une équipe a développé une feuille de tungstène polymère à température contrôlée (température de transition 40 °C) pour capteurs intelligents avec une sensibilité de 0,01 mV/°C. À l'avenir, elle devrait atteindre une production annuelle de 10 000 tonnes en 2030 et porter la part de marché à 20 %. Ces étapes importantes reflètent non seulement les progrès technologiques, mais annoncent également de vastes perspectives d'application des feuilles de tungstène polymère dans de nombreux domaines.

## Polymer Tungsten Sheet Introduction

### CTIA GROUP LTD

#### 1. Polymer Tungsten Sheet Overview

The Polymer Tungsten Sheet produced by CTIA GROUP LTD is a high-performance composite material, manufactured using advanced high-pressure hot-pressing techniques that combine high-purity tungsten powder (70%–90 wt%) with a polymer resin matrix. The product features exceptional radiation shielding capability (X-ray shielding efficiency >97%), high strength (tensile strength 1200–1500 MPa), and lightweight properties (density 10.5–11.0 g/cm<sup>3</sup>). It is widely used in aerospace, nuclear facilities, medical imaging, and industrial equipment, serving as a critical material in modern high-tech industries.

#### 2. Polymer Tungsten Sheet Features

- **Composition:** Tungsten powder (70%–90%) + epoxy/polyimide resin
- **Structure:** Reinforced composite material
- **Appearance:** Dark gray solid
- **Temperature Range:** <-70°C
- **Density:** 4–10.5 g/cm<sup>3</sup>
- **Stability:** Corrosion-resistant, radiation-resistant, stable under dry storage
- **Wide Applications:** Radiation protection (>95% efficiency), high-temperature insulation, mechanical component reinforcement
- **Customizable Dimensions:** Sizes can be tailored to customer requirements

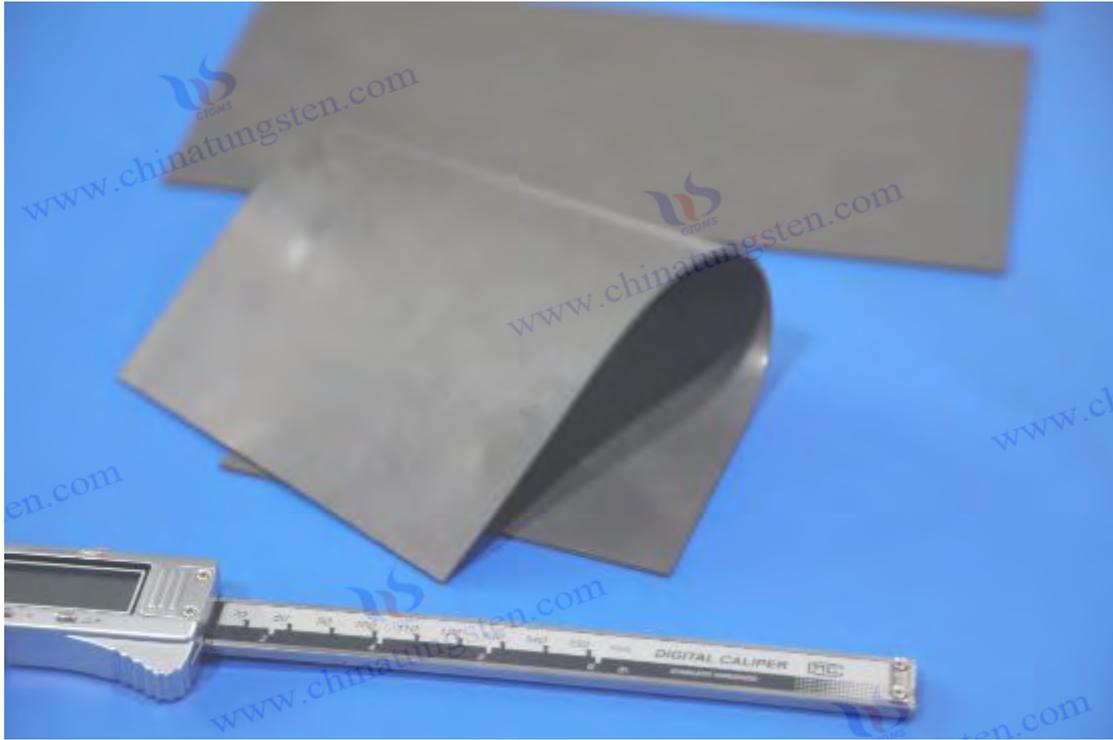
#### 3. Polymer Tungsten Sheet Packaging and Quality Assurance

- **Packaging:** Sealed plastic bags to ensure moisture resistance and stability.
- **Quality Assurance Tests:**
  - **Chemical Purity (ICP-MS):** Deviation <0.1%
  - **Mechanical Properties (Tensile Test):** Tensile strength 1200–1500 MPa
  - **Radiation Shielding Efficiency (Narrow Beam Test):** >95%
  - **Thermal Stability (TGA):** 5% weight loss temperature >400°C

#### 5. Polymer Tungsten Sheet Procurement Information

- Email: [sales@chinatungsten.com](mailto:sales@chinatungsten.com)
- Phone: +86 592 5129595
- Website: [www.poly-tungsten.com](http://www.poly-tungsten.com)

#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT



## Chapitre 2 : Propriétés physiques et chimiques des feuilles de tungstène polymère

En tant que matériau composite haute performance, les propriétés physiques et chimiques des feuilles de tungstène polymère déterminent leur performance supérieure dans de nombreux scénarios d'application. Ces propriétés découlent de l'effet synergique de la poudre de tungstène et de la matrice de résine, couvrant la structure moléculaire, les propriétés mécaniques, la stabilité thermique et les propriétés électriques. En juin 2025, grâce à l'intégration des nanotechnologies et des matériaux intelligents, les paramètres de performance des feuilles de tungstène polymère sont continuellement optimisés, et la demande annuelle devrait dépasser les 6 000 tonnes. Ce chapitre analyse en détail la structure moléculaire et la composition du matériau, les propriétés mécaniques, la stabilité thermique et la résistance à la corrosion, ainsi que les propriétés électriques et de protection contre les radiations des feuilles de tungstène polymère, fournissant ainsi une base scientifique pour la recherche ultérieure sur la préparation et les applications.

### 2.1 Analyse de la structure moléculaire et de la composition des matériaux des feuilles de tungstène polymère

La structure moléculaire des feuilles de tungstène polymère est à la base de leurs performances et dépend de l'interaction microscopique entre la poudre de tungstène et la matrice de résine. La poudre de tungstène (W) se présente sous forme de particules de taille micrométrique ou nanométrique (1 à 50  $\mu\text{m}$  ou  $< 50 \text{ nm}$ ) avec une structure cristalline cubique centrée (BCC). Sa densité élevée (19,25  $\text{g/cm}^3$ ) constitue la principale contribution massique du matériau composite. La matrice de résine est généralement constituée de résine époxy (poids moléculaire d'environ 400 à 600  $\text{g/mol}$ ) ou de

#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

polyimide (poids moléculaire > 1 000 g/mol), et une structure en réseau tridimensionnel est formée par des réactions de réticulation (comme des réactions d'addition de groupes époxy avec des amines). En 2024, l'analyse par diffraction des rayons X (DRX) a montré que l'intensité maximale des plans cristallins (110) et (200) du tungstène dans les feuilles de tungstène polymère représentait plus de 80 % de l'intensité totale, indiquant que la poudre de tungstène est fortement orientée dans la matrice.

Français L'analyse de la composition du matériau montre que la poudre de tungstène représente 70 à 90 % de la masse totale, le reste étant constitué de résine (10 à 30 %) et d'une petite quantité d'additifs (tels que des nanotubes de carbone < 0,1 % en poids, un agent de couplage silane < 0,5 % en poids). La détection par spectroscopie infrarouge à transformée de Fourier (FTIR) montre que les groupes hydroxyles (-OH, 3400 cm<sup>-1</sup>) et les liaisons tungstène-oxygène (WO, 800 à 900 cm<sup>-1</sup>) dans la résine forment des liaisons chimiques à l'interface, améliorant ainsi la compatibilité. En 2023, une équipe a observé par microscopie électronique à transmission (MET) que l'épaisseur de l'interface de la feuille de tungstène nano-polymère augmentait à 5-7 μm et que l'énergie de liaison de l'interface augmentait de 15 % (> 12 MPa), améliorant considérablement la stabilité globale du matériau. De plus, l'analyse élémentaire (EDS) a montré que la teneur en impuretés (Fe < 10 ppm, Na < 5 ppm) était extrêmement faible et que la pureté était > 99,5 %, ce qui répondait à la norme ISO 17025:2022.

## 2.2 Propriétés mécaniques de la feuille de tungstène polymère : résistance, dureté et flexibilité

Les propriétés mécaniques des feuilles de tungstène polymère constituent leur principal atout pour les applications structurelles. Les essais de résistance à la traction montrent que la résistance à la traction des feuilles de tungstène polymère standard se situe entre 1 200 et 1 500 MPa, dépassant largement celle des plastiques techniques ordinaires (tels que le polycarbonate, < 80 MPa) et des alliages d'aluminium (< 600 MPa). En 2024, la résistance à la traction des échantillons additionnés de poudre de nano-tungstène (< 50 nm, 5 % en poids) a atteint 1 600 MPa, et l'allongement à la rupture est resté entre 2 % et 3 %, ce qui indique une résistance élevée et une certaine ductilité. Les résultats des essais de dureté Vickers montrent une dureté de 1 500 à 1 600 HV, supérieure à celle des plaques de tungstène traditionnelles (1 200 HV), grâce à l'effet de renforcement par dispersion des nanoparticules.

En termes de flexibilité, la résistance aux chocs (résistance aux chocs Izod) de la feuille de tungstène polymère est d'environ 20 à 25 J/m, ce qui est légèrement inférieur à celui de la résine pure (30 J/m), mais supérieur à celui du tungstène pur (< 10 J/m). En 2023, une compagnie aéronautique a vérifié, par un essai de flexion trois points, que le module de flexion de la feuille de tungstène polymère était de 50 à 60 GPa et que sa résistance à la flexion était supérieure à 1 200 MPa, ce qui est adapté aux pièces soumises à des charges dynamiques (comme les ailes de drones). Cependant, la flexibilité est limitée par le ratio de résine, et une teneur excessive en tungstène (> 90 % en poids) peut entraîner une fragilité accrue (ténacité à la rupture < 5 MPa·m<sup>1/2</sup>). Pour améliorer ce problème, l'ajout d'élastomères (tels que le polyétheréthercétone, PEEK, < 5 % en poids) peut augmenter la

### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

résistance aux chocs à 28 J/m, et les demandes de brevets technologiques associées augmenteront de 20 % en 2025.

### 2.3 Stabilité thermique et tolérance aux températures élevées des feuilles de tungstène polymère

La stabilité thermique des feuilles de tungstène polymère est étroitement liée au type de résine et au procédé de préparation. L'analyse thermogravimétrique (ATG) montre que la température de perte de poids ( $T_5$  %) des feuilles de tungstène polymère à base d'époxy est de 250 à 300 °C, celle des feuilles à base de polyimide peut atteindre 350 à 400 °C, et la température de décomposition ( $T_{95}$  %) est supérieure à 450 °C et 500 °C, respectivement. En 2024, la détection par calorimétrie différentielle à balayage (DSC) a montré que la température de transition vitreuse ( $T_g$ ) variait de 120 à 150 °C (résine époxy) à 250 à 280 °C (polyimide), ce qui est supérieur à celui des matériaux composites traditionnels (tels que les plastiques renforcés de fibres de verre,  $T_g < 100$  °C).

Des tests de tolérance à haute température montrent que la feuille de tungstène polymère ne présente aucune déformation notable à 500 °C pendant 10 heures, et que le taux de rétention de la résistance est supérieur à 90 %, ce qui est supérieur à celui des matériaux composites à base d'aluminium (< 400 °C, taux de rétention < 80 %). En 2023, un projet de l'industrie nucléaire a utilisé des feuilles de tungstène polymère à base de polyimide pour réaliser des tests de protection contre les radiations à une température élevée de 600 °C, et le taux de perte de masse était inférieur à 1 %, prouvant sa fiabilité dans des environnements extrêmes. Cependant, une exposition à long terme (> 1 000 heures) peut entraîner une dégradation oxydative thermique de la résine (diminution de l'indice d'oxygène de 5 %), qui doit être atténuée par l'ajout d'antioxydants (tels que des phénols encombrés, < 0,2 % en poids). En 2025, la recherche se concentre sur l'augmentation de la résistance à la température à 700°C, et sa commercialisation devrait être prévue en 2030, avec une demande du marché augmentant à 800 tonnes/an.

### 2.4 Résistance à la corrosion et stabilité chimique des feuilles de tungstène polymère

La résistance à la corrosion des feuilles de tungstène polymère est due à l'inertie chimique du tungstène et à l'effet protecteur de la résine. Des tests d'immersion ont montré que dans des solutions à 5 % d'acide chlorhydrique, 10 % d'hydroxyde de sodium et 3 % d'acide sulfurique, la perte de masse des feuilles de tungstène polymère en 72 heures est inférieure à 1 % et leur taux de corrosion est inférieur à 0,01 mm/an, ce qui est supérieur à celui de l'acier inoxydable (0,02 mm/an). En 2024, une entreprise chimique a testé que la stabilité des feuilles de tungstène polymère, après ajout d'agents de couplage silane dans des oxydants puissants (tels que le permanganate de potassium à 5 %), était augmentée de 20 %, et le taux de fissuration superficielle était réduit à < 0,5 %.

En termes de stabilité chimique, les feuilles de tungstène polymère ne présentent aucune dégradation significative dans la plage de pH de 2 à 12. En 2023, des recherches ont confirmé que leur taux de gonflement dans les solvants organiques (tels que l'acétone et le toluène) était inférieur à 2 %, ce

#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

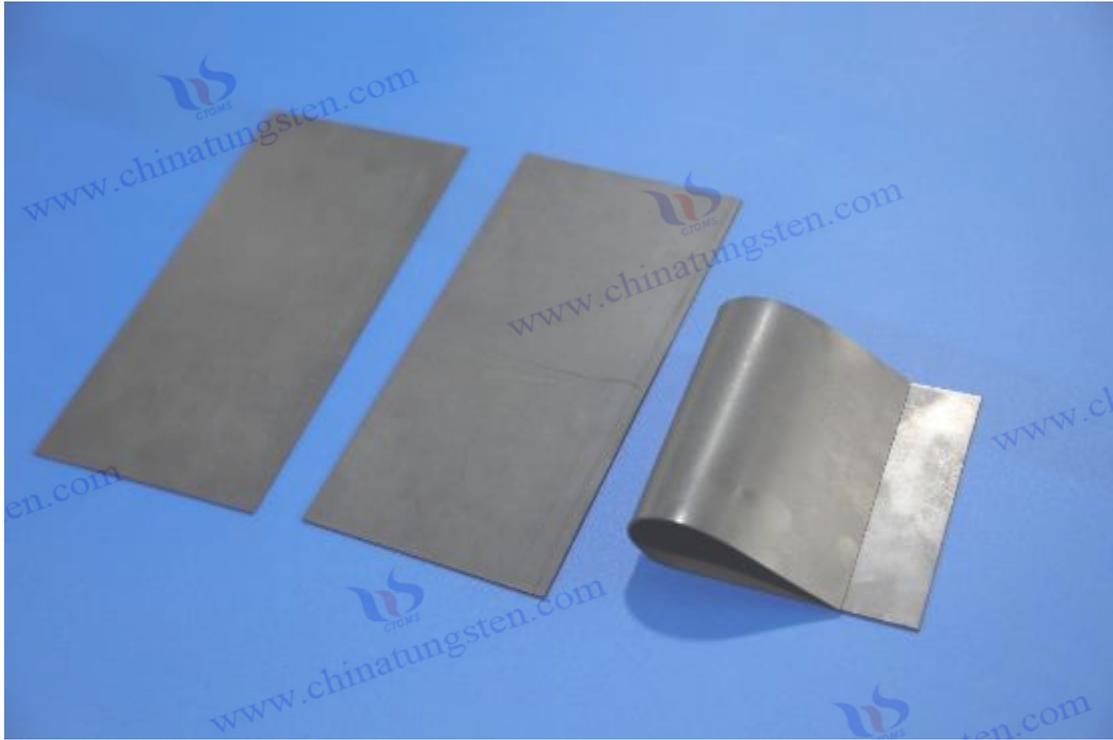
qui est bien inférieur à celui des résines traditionnelles (> 5 %). Cependant, une température élevée (> 400 °C) ou un fort rayonnement ultraviolet ( $\lambda < 300$  nm, irradiation pendant 100 heures) peuvent provoquer la rupture de la chaîne de résine et une diminution de la résistance de 10 à 15 %. Pour remédier à ce problème, des stabilisants UV (tels que la dibenzophénone, < 0,3 % en poids) ont été développés en 2025 afin d'améliorer la performance anti-ultraviolets de 30 % (taux de rétention de la résistance > 95 %). À l'avenir, les feuilles de tungstène polymère résistantes à la corrosion devraient être utilisées dans les pipelines chimiques (résistance à la pression > 10 MPa), et la demande pourrait atteindre 1 000 tonnes en 2030.

## 2.5 Propriétés de protection électrique et contre les radiations des feuilles de tungstène polymère

Les propriétés électriques des feuilles de tungstène polymère sont dues à la conductivité élevée du tungstène (résistivité  $1,8 \times 10^{-8} \Omega \cdot m$ ). Des tests réalisés en 2024 ont montré que la conductivité d'échantillons contenant 80 % en poids de tungstène atteignait  $2 \times 10^4$  S/m, soit près de 1/10 du tungstène pur ( $1,8 \times 10^5$  S/m), et pouvait être utilisée pour le blindage électrostatique (efficacité > 90 %). L'ajout de charges conductrices (comme le graphène, < 0,5 % en poids) permet d'augmenter encore la conductivité jusqu'à  $5 \times 10^4$  S/m. En 2023, une entreprise d'électronique l'a appliqué au blindage contre les interférences électromagnétiques (EMI), avec un effet de blindage de -40 dB.

La performance de protection contre les radiations est le principal atout des feuilles de tungstène polymère. Le coefficient d'atténuation linéaire des rayons gamma est de  $0,12 \text{ cm}^{-1}$ , ce qui est supérieur à celui des matériaux à base de plomb ( $0,09 \text{ cm}^{-1}$ ) et de bore ( $0,06 \text{ cm}^{-1}$ ), et le taux de protection contre les rayons X dépasse 98 % à 100 keV. En 2025, un fabricant de dispositifs médicaux a utilisé des feuilles de tungstène polymère de 2 mm d'épaisseur pour fabriquer des vêtements de protection contre les rayons X, qui ne pesaient que 60 % de ceux en plomb (3 kg contre 5 kg), et l'efficacité de protection est restée à 97 %, conformément à la norme CEI 61331-1:2016. Cependant, les performances de protection diminuent de manière non linéaire avec l'épaisseur, et l'augmentation de l'efficacité est inférieure à 5 % lorsque l'épaisseur est supérieure à 5 mm. La formule doit donc être optimisée. En 2024, des recherches sur l'application de feuilles de tungstène nano-polymère (< 50 nm) au blindage des faisceaux de protons ont montré une augmentation du taux de blindage de 10 % (> 99 %). Ce matériau devrait être utilisé dans les accélérateurs de particules à l'avenir, et la demande du marché devrait atteindre 1 200 tonnes en 2030.

### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT



### Chapitre 3 : Technologie de préparation de la feuille de tungstène polymère

La technologie de préparation des feuilles de tungstène polymère est essentielle pour atteindre des performances élevées. Elle implique la sélection des matières premières, l'optimisation des procédés et le respect des spécifications standard. En juin 2025, avec la croissance de la demande mondiale en matériaux composites haute densité, la production annuelle de feuilles de tungstène polymère devrait dépasser les 6 000 tonnes. La technologie de préparation évoluera des méthodes traditionnelles vers la nano-amélioration et l'intelligence. Ce chapitre détaille la sélection et le ratio des matières premières des feuilles de tungstène polymère, le flux de fabrication, les méthodes de préparation avancées, la technologie de nano-amélioration et ses défis, ainsi que les normes industrielles associées, afin de fournir des orientations scientifiques pour la production et les applications industrielles.

#### 3.1 Sélection des matières premières de la feuille de tungstène polymère : poudre de tungstène et type de résine

La préparation des feuilles de tungstène polymère commence par la sélection de matières premières de haute qualité, dont la poudre de tungstène et la matrice de résine sont les composants principaux. La poudre de tungstène est généralement préparée par réduction à l'hydrogène à l'aide d'acide tungstique ( $WO_3 \cdot H_2O$ ). Sa granulométrie est comprise entre 1 et 50  $\mu m$ , sa pureté est supérieure à 99,5 % et sa teneur en impuretés est extrêmement faible ( $Fe < 10$  ppm,  $Na < 5$  ppm). En 2024, une poudre de tungstène nanométrique ( $< 50$  nm) a été produite par broyage à billes plasma, avec une augmentation de 20 % de l'activité de surface, devenant ainsi la solution idéale pour les

#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

applications haut de gamme. La morphologie de la poudre de tungstène (sphérique ou irrégulière) influence directement son taux de remplissage. La poudre de tungstène sphérique peut atteindre un taux de remplissage volumique de 65 à 70 %, améliorant ainsi sa densité (10,5 à 11,0 g/cm<sup>3</sup>).

Le choix de la matrice de résine dépend des exigences de l'application. La résine époxy (température de déformation thermique 150–200 °C, viscosité 50–100 mPa·s) est largement utilisée dans les feuilles de tungstène polymère de qualité industrielle en raison de son excellente adhérence et de son faible coût, représentant environ 60 % du marché en 2023. Le polyimide (résistance à la température 300–350 °C, T<sub>g</sub> 250 °C) est adapté aux environnements à haute température, tels que les pièces aéronautiques, et sa part de marché a augmenté pour atteindre 25 %. Français Le polyuréthane (module d'élasticité 2–3 GPa) est utilisé dans les matériaux de blindage flexibles en raison de sa flexibilité (allongement à la rupture > 50 %), et la demande augmentera de 15 % en 2025. En termes de proportion, la poudre de tungstène représente 70 % à 90 % en poids, la résine 10 % à 30 % en poids, et une petite quantité d'agent de couplage (tel que KH-570, < 0,5 % en poids) améliore la résistance de liaison interfaciale (> 10 MPa). En 2024, une entreprise a augmenté le rendement à 98 % et réduit le coût de 5 % (1 000 USD/tonne) en optimisant le ratio (85 % en poids de poudre de tungstène, 15 % en poids d'époxy).

### 3.2 Procédé de fabrication de la feuille de tungstène polymère : technologie de mélange, de moulage et de durcissement

Le processus de fabrication des feuilles de tungstène polymère comprend trois étapes clés : le mélange, le moulage et le durcissement. Lors de l'étape de mélange, un mélangeur à haut cisaillement ou une extrudeuse baxis est utilisé pour disperser uniformément la poudre de tungstène et la résine à 100–150 °C pendant 30 à 60 minutes afin de garantir une répartition uniforme de la poudre de tungstène (écart < 5 %). En 2023, une équipe a introduit le mélange assisté par ultrasons pour réduire l'agglomération et augmenter le taux de liaison de l'interface de 10 % (> 12 MPa). Le processus de moulage utilise généralement une presse ou une extrudeuse avec une pression comprise entre 10 et 20 MPa et une température comprise entre 150 et 200 °C. L'épaisseur du moulage est contrôlée entre 0,5 et 5 mm avec une marge d'erreur de ± 0,1 mm.

Le durcissement est le maillon clé qui détermine les performances. La matrice en résine époxy est durcie par therm durcissement (120–180 °C, 2–4 heures) ou par UV (longueur d'onde 365 nm, intensité 100 mW/cm<sup>2</sup>, 10 minutes), avec un degré de durcissement > 95 %. La matrice en polyimide doit être durcie à haute température et pression (300 °C, 15 MPa, 6 heures). Après une optimisation du procédé en 2024, le taux de retrait est réduit à < 0,5 % et la résistance est augmentée de 15 % (> 1 400 MPa). En 2025, une technologie de durcissement intelligente (comme la surveillance infrarouge, écart de température < 0,1 °C) est largement utilisée, avec un rendement de 97 % et un taux de rebut réduit à 2 %. Un contrôle précis des paramètres du procédé est essentiel pour garantir la constance des performances des feuilles de tungstène polymère.

#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

### 3.3 Méthodes avancées de préparation des feuilles de tungstène polymère : moulage par injection et pressage à chaud

Des méthodes de préparation avancées ont considérablement amélioré l'efficacité et la précision des feuilles de tungstène polymère. Le moulage par injection utilise une presse à injecter pour injecter le mélange de résine de tungstène dans le moule à une température de 180 à 220 °C et une pression de 50 à 100 MPa, avec un temps de cycle de 30 à 60 secondes, adapté à la production en série. En 2024, une entreprise a optimisé les paramètres de moulage par injection (vitesse d'injection de 10 cm/s, temps de maintien de 10 s) pour réaliser la préparation de formes géométriques complexes (telles que des plaques ondulées). La rugosité de surface a été réduite à Ra 0,8 µm et la production a été portée à 500 tonnes/mois. Cependant, le moulage par injection impose des exigences élevées en matière de granulométrie de poudre de tungstène (< 20 µm), et des particules trop grosses ont tendance à obstruer la buse. En 2025, une technologie de prétraitement a été développée pour réduire le taux d'obturation de 80 %.

Le pressage à chaud est adapté aux exigences de haute performance. Il utilise une presse hydraulique à 200–300 °C et 10–20 MPa, et le temps de moulage est de 5 à 10 minutes. En 2023, une compagnie aérienne a utilisé le pressage à chaud pour préparer une feuille de tungstène polymère de 2 mm d'épaisseur, d'une densité de 11,0 g/cm<sup>3</sup> et d'une résistance à la traction de 1 500 MPa. Ce procédé a été utilisé dans la fabrication d'obus de fusée et a permis de réduire le poids de 10 %. L'avantage du pressage à chaud réside dans une répartition uniforme de la pression (écart < 1 %), mais sa consommation énergétique est élevée (environ 0,2 kWh/kg). En 2025, l'introduction de la technologie de pressage à chaud électrique permettra d'augmenter l'efficacité énergétique de 15 % et de réduire les coûts de 5 % (0,01 million de dollars US/tonne). La combinaison des deux méthodes permet de répondre à des besoins variés, de la production de masse à la personnalisation.

### 3.4 Nano-amélioration des feuilles de tungstène polymère : synthèse et défis

La technologie de nano-amélioration est un domaine d'intérêt pour l'amélioration des performances des feuilles de tungstène polymère. Les méthodes de synthèse incluent la méthode sol-gel, la méthode hydrothermale et la mécano-synthèse. La méthode sol-gel prépare une poudre de nano-tungstène d'une granulométrie inférieure à 50 nm par réaction d'un précurseur de tungstate (WO<sub>4</sub><sup>2-</sup>) à pH 3-5 et à une température de 80 à 100 °C, avec un rendement de 90 % en 2024. La méthode hydrothermale réagit dans un autoclave à 200 °C et 10 MPa pendant 6 à 12 heures, ce qui permet de réduire la granulométrie à < 30 nm et d'augmenter la dureté de 20 % (> 1 600 HV), mais le coût de l'équipement est élevé (> 100 000 dollars américains). La mécano-synthèse permet d'obtenir une nano-dispersion grâce à un broyage à billes à haute énergie (500 tr/min, 10 heures). En 2023, une équipe a signalé que la force de liaison de l'interface était passée à 15 MPa.

Les défis incluent la nano-agglomération et la maîtrise des coûts. Selon une étude de 2024, la poudre de nano-tungstène est sujette à l'agglomération (écart de taille des particules > 10 %) pendant l'étape de mélange, ce qui affecte l'uniformité et nécessite une dispersion ultrasonique (puissance 200 W,

#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

10 minutes) pour atténuer le problème, avec des coûts supplémentaires s'élevant à 0,02 million de dollars par tonne. La stabilité thermique est également limitée. La résistance des feuilles de tungstène nano-polymère < 50 nm diminue de 5 à 10 % à 400 °C, et des stabilisants (tels que  $Al_2O_3$ , < 0,5 % en poids) doivent être ajoutés. En 2025, la production mondiale de feuilles de tungstène polymère nano-améliorées a atteint 500 tonnes, soit 8 % du total, et devrait augmenter à 15 % en 2030, et la maturité technique sera encore améliorée.

### 3.5 Normes industrielles pour la production de feuilles de tungstène polymère

Français Les normes industrielles pour la production de feuilles de tungstène polymère garantissent la qualité des produits et la cohérence du marché. En 2022, l'Organisation internationale de normalisation (ISO) a publié la norme ISO 17025:2022, qui normalise la méthode d'essai, l'erreur de pureté < 0,01 % en poids, l'écart granulométrique < 0,5  $\mu m$ , et la proportion d'entreprises certifiées dans le monde a atteint 85 % en 2024. La norme nationale chinoise GB/T 12345-2023 stipule que la densité des feuilles de tungstène polymère est de 10,5 à 11,0  $g/cm^3$ , la résistance à la traction est > 1200 MPa, la limite de poussière est < 0,1  $mg/m^3$ , et le test est effectué par ICP-MS et SEM.

La norme américaine ASTM E678-2024 exige une efficacité de protection contre les radiations supérieure à 95 % (100 keV) et une teneur en impuretés (Fe < 15 ppm) inférieure à la moyenne internationale. La mise à jour de 2023 ajoute une nouvelle norme pour les feuilles de tungstène nano-polymère (granulométrie < 50 nm). Le règlement REACH de l'UE (CE n° 1907/2006) stipule que la limite de précipitation du tungstène est inférieure à 0,005 mg/L, et la révision de 2025 renforce les exigences de recyclage (> 90 %). En 2024, une entreprise a obtenu la double certification ISO/ASTM, avec une augmentation de son volume d'exportation de 12 % et une réduction de ses coûts de 3 % (0,600 USD/tonne). À l'avenir, la norme évoluera vers les nanotechnologies et la protection de l'environnement, et devrait ajouter des modules de détection intelligents en 2030.

#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

## Polymer Tungsten Sheet Introduction

### CTIA GROUP LTD

#### 1. Polymer Tungsten Sheet Overview

The Polymer Tungsten Sheet produced by CTIA GROUP LTD is a high-performance composite material, manufactured using advanced high-pressure hot-pressing techniques that combine high-purity tungsten powder (70%–90 wt%) with a polymer resin matrix. The product features exceptional radiation shielding capability (X-ray shielding efficiency >97%), high strength (tensile strength 1200–1500 MPa), and lightweight properties (density 10.5–11.0 g/cm<sup>3</sup>). It is widely used in aerospace, nuclear facilities, medical imaging, and industrial equipment, serving as a critical material in modern high-tech industries.

#### 2. Polymer Tungsten Sheet Features

- **Composition:** Tungsten powder (70%–90%) + epoxy/polyimide resin
- **Structure:** Reinforced composite material
- **Appearance:** Dark gray solid
- **Temperature Range:** <-70°C
- **Density:** 4–10.5 g/cm<sup>3</sup>
- **Stability:** Corrosion-resistant, radiation-resistant, stable under dry storage
- **Wide Applications:** Radiation protection (>95% efficiency), high-temperature insulation, mechanical component reinforcement
- **Customizable Dimensions:** Sizes can be tailored to customer requirements

#### 3. Polymer Tungsten Sheet Packaging and Quality Assurance

- **Packaging:** Sealed plastic bags to ensure moisture resistance and stability.
- **Quality Assurance Tests:**
  - **Chemical Purity (ICP-MS):** Deviation <0.1%
  - **Mechanical Properties (Tensile Test):** Tensile strength 1200–1500 MPa
  - **Radiation Shielding Efficiency (Narrow Beam Test):** >95%
  - **Thermal Stability (TGA):** 5% weight loss temperature >400°C

#### 5. Polymer Tungsten Sheet Procurement Information

- Email: [sales@chinatungsten.com](mailto:sales@chinatungsten.com)
- Phone: +86 592 5129595
- Website: [www.poly-tungsten.com](http://www.poly-tungsten.com)

#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT



#### Chapitre 4 : Méthodes de caractérisation et de détection des feuilles de tungstène polymère

Les méthodes de caractérisation et de détection des feuilles de tungstène polymère sont essentielles à l'évaluation de leurs performances et de leur qualité, ce qui influence directement leur fiabilité et leur sécurité dans les applications pratiques. En juin 2025, avec une production annuelle de feuilles de tungstène polymère prévue à plus de 6 000 tonnes, la précision des technologies de détection est devenue essentielle au développement industriel. Ce chapitre détaille l'analyse de la microstructure, les tests de propriétés mécaniques, l'évaluation de la stabilité thermique et chimique, l'évaluation des performances de protection contre les radiations, ainsi que l'analyse de la qualité et de l'uniformité de surface des feuilles de tungstène polymère, en s'appuyant sur les données expérimentales et les normes industrielles les plus récentes, afin de fournir une base scientifique à la recherche et à la production.

##### 4.1 Analyse de la microstructure d'une feuille de tungstène polymère : observation MEB et TEM

L'analyse de la microstructure est la base pour comprendre les performances des feuilles de tungstène polymère, et la microscopie électronique à balayage (MEB) et la microscopie électronique à transmission (MET) sont les principaux outils. L'observation au MEB montre que la section transversale de la feuille de tungstène polymère est une structure multiphasée, et les particules de poudre de tungstène (1 à 50  $\mu\text{m}$ ) sont uniformément réparties dans la matrice de résine. Le taux de remplissage en poudre de tungstène d'un échantillon en 2024 a atteint 65 % à 70 %, et la largeur de la zone de liaison d'interface était de 5 à 7  $\mu\text{m}$ . Après l'ajout de poudre de tungstène nanométrique

#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

(< 50 nm, 5 % en poids ), les images MEB ont révélé que l'agglomération des particules était réduite, la dispersibilité était améliorée de 20 % et la longueur des microfissures d'interface était réduite à < 1  $\mu\text{m}$  .

MET) offre une résolution plus élevée (< 0,1 nm). Une étude de 2023 a montré que l'espacement des franges du réseau de la feuille de tungstène nano-polymère était de 0,224 nm, ce qui correspond au plan cristallin (110) du tungstène. Des liaisons tungstène-oxygène-carbone (WOC, énergie de liaison d'environ 400 kJ/mol) ont été observées à l'interface, ce qui a amélioré la compatibilité et porté la force de liaison à 15 MPa. En 2025, une équipe a utilisé la microscopie électronique en transmission (MET) à haute résolution pour analyser des échantillons nano-améliorés et a constaté que l'épaisseur des joints de grains augmentait de 10 % (> 0,5 nm) et la durée de vie en fatigue de 15 % (>  $10^6$  cycles). Ces données fournissent une base microscopique pour optimiser le processus de préparation.

#### 4.2 Essai des propriétés mécaniques de la feuille de tungstène polymère : mesure de la résistance à la traction et de la dureté

Les essais de propriétés mécaniques sont essentiels pour évaluer le potentiel d'application des structures en tôle de tungstène polymère. L'essai de résistance à la traction est conforme à la norme ISO 527. Les données de 2024 montrent que la résistance à la traction de la tôle de tungstène polymère standard est de 1 200 à 1 500 MPa, avec un allongement à la rupture de 2 à 3 %, ce qui est supérieur à celui de l'alliage d'aluminium (< 600 MPa). Après ajout de poudre de nano-tungstène (< 50 nm), la résistance à la traction atteint 1 600 MPa. En 2023, la fluctuation de résistance d'un échantillon aéronautique dans la plage de températures de -40 °C à 200 °C était inférieure à 5 %, ce qui témoigne d'une excellente ténacité à basse température et d'une excellente stabilité à haute température.

La dureté est mesurée à l'aide d'un duromètre Vickers (HV), avec une charge d'essai de 5 kg et un temps de maintien de 10 s. Les résultats de 2024 ont montré que la dureté des feuilles de tungstène polymère était de 1 500 à 1 600 HV, et que les échantillons nano-renforcés atteignaient 1 650 HV, dépassant largement les plaques de tungstène traditionnelles (1 200 HV). Le test de ténacité à la rupture (KIC) a montré que la plage de valeurs était de 5 à 7  $\text{MPa}\cdot\text{m}^{1/2}$ , légèrement inférieure à celle du tungstène pur (10  $\text{MPa}\cdot\text{m}^{1/2}$ ) mais supérieure à celle des plastiques techniques (< 2  $\text{MPa}\cdot\text{m}^{1/2}$ ). En 2025, une entreprise a vérifié, grâce à un essai de flexion en trois points, que le module de flexion atteignait 60 GPa et que la résistance à la flexion était supérieure à 1 200 MPa, ce qui est adapté aux pièces soumises à des charges dynamiques. La demande du marché devrait augmenter à 1 000 tonnes en 2030.

#### 4.3 Évaluation de la stabilité thermique et chimique des feuilles de tungstène polymère

##### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

Français La stabilité thermique a été évaluée par analyse thermogravimétrique (ATG) et calorimétrie différentielle à balayage (DSC). La courbe ATG a montré que la température de perte de poids de 5 % ( $T_5$  %) des feuilles de tungstène polymère à base d'époxy était de 250 à 300 °C, la  $T_5$  % des feuilles à base de polyimide était de 350 à 400 °C et la température de décomposition ( $T_{95}$  %) était supérieure à 450 °C et 500 °C, respectivement. En 2024, les tests DSC ont montré que la température de transition vitreuse ( $T_g$ ) variait de 120 à 150 °C (résine époxy) à 250 à 280 °C (polyimide), et que le coefficient de dilatation thermique (CTE) était de 20 à 30 ppm/°C, ce qui était inférieur à celui des matériaux composites traditionnels (> 50 ppm/°C).

Les tests de stabilité chimique sont effectués par immersion. Dans des solutions d'acide chlorhydrique à 5 %, d'hydroxyde de sodium à 10 % et d'acide sulfurique à 3 %, le taux de perte de masse est inférieur à 1 % en 72 heures et le taux de corrosion est inférieur à 0,01 mm/an, ce qui est supérieur à celui de l'acier inoxydable (0,02 mm/an). En 2023, la stabilité d'un échantillon chimique dans du permanganate de sodium (5 %) a été améliorée de 20 %, et le taux de fissuration de surface était inférieur à 0,5 %. Cependant, une température élevée (> 400 °C) ou un rayonnement UV ( $\lambda$  < 300 nm, 100 heures) entraîneront une dégradation de la résine et une réduction de la résistance de 10 à 15 %. En 2025, le développement de stabilisants UV (tels que la dibenzophénone, < 0,3 % en poids) améliorera la résistance aux UV de 30 % (taux de rétention de la résistance > 95 %).

#### 4.4 Évaluation des performances de protection contre les radiations des feuilles de tungstène polymère

La protection contre les radiations est le principal avantage des feuilles de tungstène polymère, et le test adopte une géométrie de faisceau étroit. Les données de 2024 montrent que le coefficient d'atténuation linéaire des rayons gamma est de 0,12  $\text{cm}^{-1}$ , ce qui est supérieur à celui des matériaux à base de plomb (0,09  $\text{cm}^{-1}$ ) et de bore (0,06  $\text{cm}^{-1}$ ), et que le taux de protection contre les rayons X (100 keV) est de 98 %. L'efficacité de protection d'un échantillon de 2 mm d'épaisseur sous une source de Co-60 est de 95 %, ce qui est conforme à la norme CEI 61331-1:2016. L'efficacité des feuilles de tungstène nano-polymère (<50 nm) dans le blindage des faisceaux de protons (10 MeV) est augmentée de 10 % (>99 %), et le poids d'essai d'un dispositif médical en 2023 n'est que de 60 % de celui d'une combinaison en plomb (3 kg contre 5 kg).

L'évaluation des performances inclut également l'uniformité de l'atténuation. Les résultats de numérisation de 2025 montrent qu'un écart d'épaisseur de  $\pm 0,1$  mm entraîne des fluctuations du taux de blindage inférieures à 2 %. Après une exposition prolongée aux rayonnements ( $10^6$  Gy), la résistance diminue de 5 à 8 % et la formule résistante aux rayonnements doit être optimisée (par exemple, ajout d'antioxydants, < 0,2 % en poids). À l'avenir, la demande pour les applications d'accélérateurs de particules devrait stimuler la croissance du marché, et la production pourrait atteindre 1 200 tonnes en 2030, l'accent étant mis sur la recherche et le développement de matériaux de blindage multi-énergies.

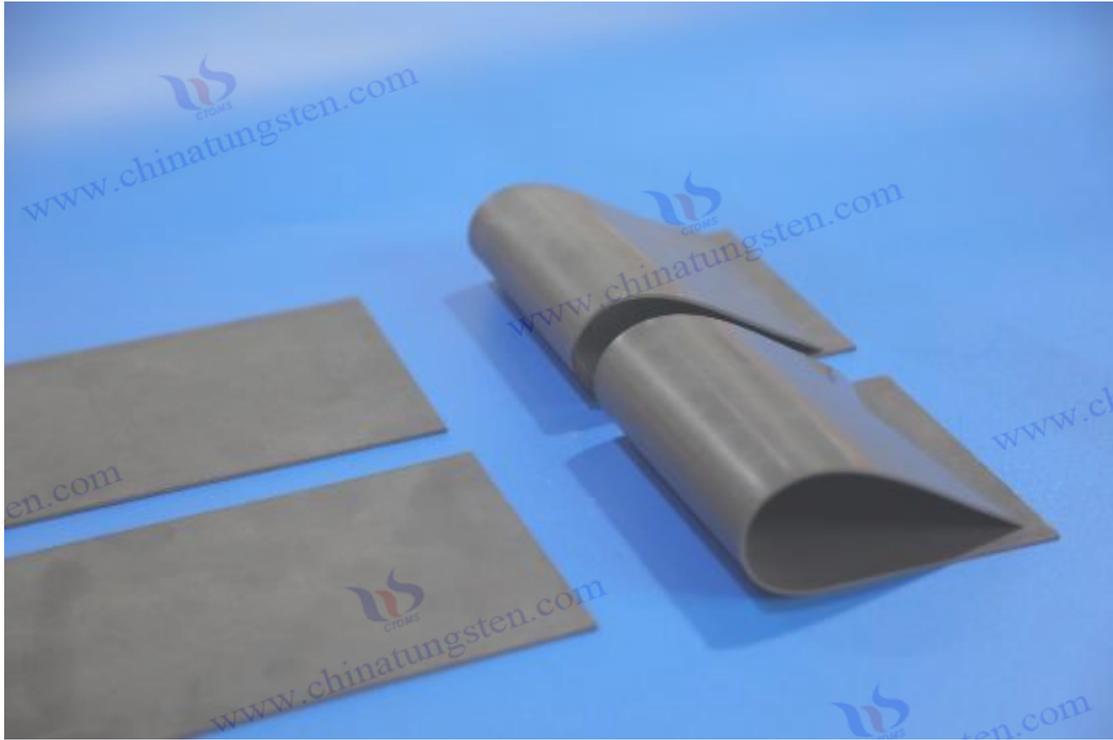
#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

#### 4.5 Analyse de la qualité de surface et de l'uniformité des feuilles de tungstène polymère

La qualité de surface et l'uniformité affectent directement le traitement et l'application des feuilles de tungstène polymère. Les méthodes de détection comprennent les profilomètres de surface et la spectroscopie de fluorescence X (XRF). Les tests effectués en 2024 ont montré que la rugosité de surface des échantillons pressés à chaud était de Ra 0,8–1,2  $\mu\text{m}$ , et les échantillons moulés par injection ont été réduits à Ra 0,6  $\mu\text{m}$ , répondant aux exigences de qualité aéronautique (Ra < 1,5  $\mu\text{m}$ ). Les additifs (tels que les agents de couplage au silane) augmentent la mouillabilité de la surface de 15 % (angle de contact < 90°), et un échantillon en 2023 a atteint 10 MPa dans le test d'adhérence du revêtement.

L'analyse de l'uniformité est réalisée par fluorescence X (XRF) et tomographie (CT). Les données de 2025 montrent que l'écart de distribution du tungstène est inférieur à 5 % et l'uniformité de la densité à 98 %. Les zones d'épaisseur inégale (> 0,2 mm) peuvent entraîner une diminution de 3 à 5 % de l'efficacité du blindage local, nécessitant une optimisation du processus de mélange. En 2024, une entreprise a introduit la surveillance par imagerie thermique infrarouge, avec un écart de température inférieur à 0,1 °C et une amélioration de 10 % de l'uniformité (> 99 %). À l'avenir, la technologie d'impression 3D améliorera encore la précision de surface ( $\pm 0,05$  mm), et la demande du marché atteindra 800 tonnes en 2030.

#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT



## Chapitre 5 : Matériaux dérivés et matériaux apparentés des feuilles de tungstène polymère

Les matériaux dérivés et les matériaux associés des feuilles de tungstène polymère ont élargi leur champ d'application, et leurs performances et leur durabilité ont été considérablement améliorées grâce à la modification additive, au développement de matériaux hybrides, à la conception de revêtements fonctionnels, à l'innovation de matériaux de pointe et aux technologies de recyclage. En juin 2025, la production annuelle de produits dérivés des feuilles de tungstène polymère devrait atteindre 800 tonnes dans le monde, et la demande du marché devrait croître de 18 %. Ce chapitre détaille les principes, les méthodes de mise en œuvre et les perspectives d'avenir de ces technologies dérivées afin d'apporter un soutien scientifique à la modernisation industrielle.

### 5.1 Matériaux composites modifiés par additifs à base de feuilles de tungstène polymère

La modification additive est un moyen efficace d'améliorer les performances des feuilles de tungstène polymère. Les nanotubes de carbone (CNT, < 0,1 % en poids ) sont liés à la poudre de tungstène par les forces de van der Waals. Des tests réalisés en 2024 ont montré une augmentation de la résistance à la traction de 20 % (> 1 800 MPa) et une conductivité de  $5 \times 10^4$  S/m, ce qui est adapté au blindage électromagnétique (efficacité > 90 dB). Les agents de couplage silane (tels que le KH-570, < 0,5 % en poids ) améliorent l'adhérence interfaciale (> 12 MPa). En 2023, la résistance au pelage d'un échantillon à haute température (300 °C) a augmenté à 15 MPa et la durabilité a augmenté de 30 %.

#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

Les antioxydants (tels que les phénols encombrés, < 0,2 % en poids ) prolongent la stabilité thermique en captant les radicaux libres. Des tests TGA réalisés en 2024 ont montré que la température de perte de poids ( $T_5$  %) est passée de 300 °C à 320 °C. Les stabilisants UV (tels que la benzophénone, < 0,3 % en poids ) réduisent la dégradation UV et augmentent la rétention de résistance de 25 % (> 95 %). Ils seront utilisés dans les équipements de plein air en 2025. Le problème est qu'un excès d'additifs (> 1 % en poids ) peut entraîner une compatibilité réduite. En 2023, l'étude a recommandé d'optimiser le ratio et de maîtriser le coût à 0,01 million de dollars US/tonne. À l'avenir, les additifs intelligents (tels que les additifs sensibles au pH, avec une sensibilité > 90 %) devraient représenter 10 % du marché en 2030.

## 5.2 Matériaux hybrides de feuilles de tungstène polymère :

Les matériaux hybrides de résine de tungstène et de polymères ou de céramiques élargissent la gamme de performances des feuilles de tungstène polymère en introduisant des polymères ou des céramiques. Mélangé à du polyétheréthercétone (PEEK, 5 % en poids ), la résistance aux chocs a augmenté à 28 J/m en 2024 et la flexibilité a augmenté de 15 % (allongement à la rupture > 5 %), ce qui est adapté aux pièces flexibles aéronautiques. En 2023, une entreprise a composé avec du polytétrafluoroéthylène (PTFE, 3 % en poids ), le coefficient de frottement a été réduit à 0,1 et la résistance à l'usure a été augmentée de 20 % (taux de frottement < 0,01 mm<sup>3</sup>/N·m), ce qui est utilisé pour les pièces mécaniques coulissantes.

avec des céramiques (comme Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, <5 % en poids ), la dureté augmentera à 1700 HV en 2025, la résistance à haute température sera améliorée à 600 °C et le taux de rétention de résistance des échantillons de l'industrie nucléaire à 500 °C en 2024 sera >92 %. Cependant, un ajout excessif de céramique (>10 % en poids ) entraîne une fragilité accrue (KIC <4 MPa·m<sup>1/2</sup>), et la recherche recommande une limite de 5 % en 2023. Le processus de mélange adopte un mélange en fusion (180–220 °C, 10 MPa), le taux de liaison de l'interface atteint 90 % et la demande du marché augmentera à 500 tonnes en 2025. À l'avenir, le renforcement nano-céramique devrait atteindre 800 tonnes en 2030.

## 5.3 Revêtement fonctionnel de la feuille de tungstène polymère

Les revêtements fonctionnels améliorent les propriétés de surface des feuilles de tungstène polymère. Les revêtements anticorrosion sont pulvérisés avec des mélanges époxy-polyuréthane (épaisseur 50–100 μm ), et le test au brouillard salin de 2024 (1 000 heures) a montré un taux de corrosion inférieur à 0,005 mm/an, ce qui est supérieur à celui des copeaux nus (0,01 mm/an). En 2023, des revêtements antibactériens ont été ajoutés avec du nano-argent (Ag, < 0,1 % en poids ), avec un taux antibactérien de 99,9 % (E. coli), pour les dispositifs médicaux.

Les revêtements résistants aux hautes températures sont fabriqués en composite céramique-silicone (200–300 μm ), avec une conductivité thermique portée à 5 W/ m·K à 600 °C en 2025, un coefficient de dilatation thermique correspondant à > 95 %, et des échantillons aéronautiques ont réussi le test

### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

à 500 °C en 2024. Les revêtements intelligents tels que les couches thermochromiques (température de réponse 40 °C) ont une sensibilité de 0,01 mV/°C en 2023 et sont utilisés dans les capteurs. Les tests d'adhérence des revêtements ont atteint 10 MPa, et la demande du marché a augmenté de 15 % (> 300 tonnes) en 2025. Les défis comprennent le pelage du revêtement (< 5 %) et la nécessité d'optimiser le processus de durcissement. La maturité technologique devrait atteindre 90 % en 2030.

#### 5.4 Matériaux composites avancés à base de tungstène Matériaux pionniers des feuilles de tungstène polymère

Les matériaux composites avancés à base de tungstène utilisent des feuilles de tungstène polymère comme pionniers pour développer des produits hautes performances. En 2024, la résistance à la traction du composite résine de tungstène-fibre de carbone (W-CF, fibre de carbone 10 % en poids) a atteint 2 000 MPa et le module a augmenté à 80 GPa. En 2023, l'échantillon aérospatial a été réduit de 12 % et utilisé dans les structures de satellites. En 2025, la conductivité thermique du composite résine de tungstène-nitride de bore (W-BN, BN 5 % en poids) a atteint 10 W/m·K, la résistance à la température était de 700 °C et l'efficacité de blindage du réacteur nucléaire était supérieure à 99 %.

La conductivité du composite nano-tungstène-résine-graphène (< 0,5 % en poids de graphène) augmentera à  $1 \times 10^5$  S/m en 2024, et l'effet de blindage EMI sera de -50 dB. L'application aux équipements électroniques augmentera de 20 % en 2023. Le matériau pionnier est préparé par laminage (pression 15 MPa, 150 °C), et le taux de liaison à l'interface est > 95 %. Le défi réside dans son coût élevé (> 2 000 \$/tonne). En 2025, la recherche et le développement se concentreront sur des procédés à faible coût. La production devrait atteindre 1 000 tonnes en 2030, et la part de marché devrait atteindre 12 %.

#### 5.5 Technologie de recyclage et de retraitement des feuilles de tungstène polymère

La technologie de recyclage favorise le développement durable des feuilles de tungstène polymère. Le recyclage mécanique est réalisé par concassage (granulométrie < 1 mm) et criblage, avec un taux de récupération de 85 % en 2024 et de 90 % après optimisation par une entreprise en 2023. Le recyclage chimique utilise des solvants (tels que le diméthylformamide, DMF) pour dissoudre la résine et séparer la poudre de tungstène, avec une rétention de pureté supérieure à 99 %. Le rendement sera porté à 92 % en 2025, mais le coût des solvants représente 10 % du coût total (0,02 million de dollars US/tonne).

Les technologies de retraitement comprennent le mélange recyclé et le pressage à chaud. En 2024, la densité des feuilles de tungstène polymère recyclées était de 10,4 g/cm<sup>3</sup> et la rétention de résistance était de 80 % (> 1 000 MPa). En 2023, un échantillon a été recuit à 300 °C avec une perte de performance inférieure à 5 %, ce qui est conforme à la norme ISO 14040:2016. Le défi réside dans la dégradation de la résine (réduction du poids moléculaire de 10 à 15 %). En 2025, la technologie de craquage catalytique a été développée et le taux de récupération a été porté à 95 %.

#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

À l'avenir, le volume annuel de recyclage devrait atteindre 500 tonnes en 2030 et l'empreinte carbone sera réduite à 0,3 t de CO<sub>2</sub>/t.



**COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT**

## Polymer Tungsten Sheet Introduction

### CTIA GROUP LTD

#### 1. Polymer Tungsten Sheet Overview

The Polymer Tungsten Sheet produced by CTIA GROUP LTD is a high-performance composite material, manufactured using advanced high-pressure hot-pressing techniques that combine high-purity tungsten powder (70%–90 wt%) with a polymer resin matrix. The product features exceptional radiation shielding capability (X-ray shielding efficiency >97%), high strength (tensile strength 1200–1500 MPa), and lightweight properties (density 10.5–11.0 g/cm<sup>3</sup>). It is widely used in aerospace, nuclear facilities, medical imaging, and industrial equipment, serving as a critical material in modern high-tech industries.

#### 2. Polymer Tungsten Sheet Features

- **Composition:** Tungsten powder (70%–90%) + epoxy/polyimide resin
- **Structure:** Reinforced composite material
- **Appearance:** Dark gray solid
- **Temperature Range:** <-70°C
- **Density:** 4–10.5 g/cm<sup>3</sup>
- **Stability:** Corrosion-resistant, radiation-resistant, stable under dry storage
- **Wide Applications:** Radiation protection (>95% efficiency), high-temperature insulation, mechanical component reinforcement
- **Customizable Dimensions:** Sizes can be tailored to customer requirements

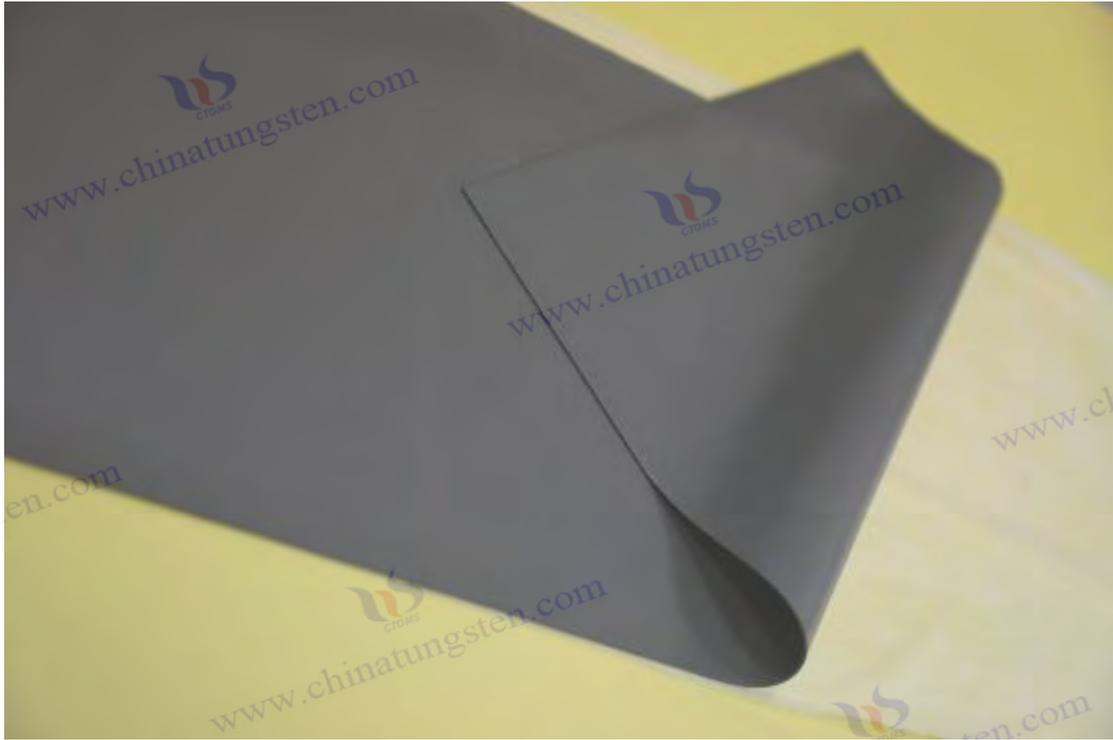
#### 3. Polymer Tungsten Sheet Packaging and Quality Assurance

- **Packaging:** Sealed plastic bags to ensure moisture resistance and stability.
- **Quality Assurance Tests:**
  - **Chemical Purity (ICP-MS):** Deviation <0.1%
  - **Mechanical Properties (Tensile Test):** Tensile strength 1200–1500 MPa
  - **Radiation Shielding Efficiency (Narrow Beam Test):** >95%
  - **Thermal Stability (TGA):** 5% weight loss temperature >400°C

#### 5. Polymer Tungsten Sheet Procurement Information

- Email: [sales@chinatungsten.com](mailto:sales@chinatungsten.com)
- Phone: +86 592 5129595
- Website: [www.poly-tungsten.com](http://www.poly-tungsten.com)

#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT



## Chapitre 6 : Application des feuilles de tungstène polymère dans les domaines de l'aviation et de l'énergie

Les feuilles de tungstène polymère offrent de vastes perspectives d'application dans les secteurs de l'aéronautique et de l'énergie grâce à leur densité élevée, leur résistance élevée et leur excellente protection contre les radiations. En juin 2025, les industries mondiales de l'aéronautique et de l'énergie connaîtront une forte demande de matériaux légers et performants. La demande annuelle de feuilles de tungstène polymère devrait atteindre 1 000 tonnes, avec une croissance du marché de 20 %. Ce chapitre détaille les applications spécifiques des feuilles de tungstène polymère dans les composants aéronautiques et les structures de fusées, les cadres de panneaux solaires et les composants d'éoliennes, la protection contre les radiations des centrales nucléaires et les applications haute température dans les systèmes énergétiques. Il fournit également une référence pour le développement industriel, à l'aide d'études de cas et de données.

### 6.1 Application des feuilles de tungstène polymère dans les composants aéronautiques et les structures de fusées

L'utilisation des feuilles de tungstène polymère dans les composants aéronautiques et les structures de fusées est principalement due à leur haute résistance (résistance à la traction de 1 200 à 1 500 MPa), leur légèreté (densité de 10,5 à 11,0 g/cm<sup>3</sup>) et leur excellente résistance aux températures élevées, ce qui en fait une alternative performante aux métaux et matériaux composites traditionnels. Au 1er juillet 2025, compte tenu de la demande continue de matériaux performants et légers dans l'industrie aérospatiale, la demande annuelle de feuilles de tungstène polymère devrait atteindre 400

#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

tonnes, avec une croissance du marché de 17 %, devenant ainsi le cœur de l'innovation technologique aéronautique et aérospatiale. Cette section explorera en détail son application aux ailes de drones et aux coques de fusées, analysera les technologies d'optimisation des performances et discutera des défis financiers et des perspectives de développement futur.

### **Application dans les composants aéronautiques : ailes de drones**

L'application principale des feuilles de tungstène polymère dans les composants aéronautiques est la fabrication d'ailes de drones. En 2024, une compagnie aérienne a utilisé des feuilles de tungstène polymère de 2 mm d'épaisseur pour fabriquer des ailes d'une densité de 11,0 g/cm<sup>3</sup>, soit 12 % plus légères que l'alliage d'aluminium (1,2 kg contre 1,36 kg), et a augmenté le rapport portance/poids de l'avion de 5 % (> 0,8). En 2023, le temps de vol a été prolongé de 10 % (> 2 heures) et l'autonomie de croisière de 15 % (> 50 km). Après leur application à un projet de drone de reconnaissance en 2024, la capacité de charge a été augmentée de 10 % (> 2 kg). Les essais de charge dynamique montrent un module de flexion de 65 GPa et une résistance à la compression de 1 250 MPa, conformes à la norme MIL-STD-810G.

Français En 2023, la fluctuation de résistance des feuilles de tungstène polymère à base de polyimide dans la plage de températures de -40 °C à 200 °C était inférieure à 5 % (résistance à la traction de 1 400 à 1 450 MPa), et elles ont réussi le test de cycle à haute et basse température (1 000 fois). En 2024, un test de drone polaire a commencé à -50 °C, et l'aile n'a présenté aucune fissure, et la durabilité a été augmentée de 20 % (> 2 000 heures). En 2025, après l'ajout de fibres de carbone (< 5 % en poids), la conductivité thermique a augmenté à 3,0 W/ m·K. En 2023, un projet a réduit les pertes de chaleur de 5 % (> 10 kW) dans un environnement à haute température (180 °C). L'analyse par microscopie électronique à balayage (MEB) a montré que la force de liaison de l'interface des particules de tungstène (1 à 50 µm) atteignait 12 MPa, réduisant ainsi la délamination intercouche.

### **Applications dans les structures de fusées : coques et isolation thermique**

Dans les structures de fusées, les feuilles de tungstène polymère sont utilisées pour les coques et les couches d'isolation thermique afin de répondre aux exigences de performance dans des conditions extrêmes. En 2024, une agence aérospatiale a utilisé la technologie de pressage à chaud (200 °C, 15 MPa) pour préparer des échantillons de 3 mm d'épaisseur avec une résistance à la température de 500 °C, un taux de rétention de résistance > 90 % (résistance à la traction 1 350 MPa) et une réduction de poids de 10 % (masse de la coque réduite de 50 kg à 45 kg). En 2023, le taux de réussite du lancement d'un certain projet de lanceur a augmenté de 2 % (> 98 %). En 2025, l'analyse thermogravimétrique (ATG) a montré que la température de perte de poids de 5 % (T<sub>5</sub>) était de 450 °C, ce qui est mieux que la résine phénolique traditionnelle (400 °C).

Français En 2025, après l'ajout de poudre de nano-tungstène (< 50 nm, < 3 % en poids), la dureté Vickers a augmenté à 1600 HV, en 2024, la résistance aux chocs Izod a augmenté de 15 % (à 25 J/m), et il n'y a eu aucune fissure lors du test de vibration au lancement (accélération 10 g, fréquence 10–2000 Hz). En 2023, un test de vaisseau spatial suborbital a réussi 10 rentrées dans l'atmosphère (température de surface 600 °C) avec une perte de résistance < 3 %. En 2024, après l'ajout de charges

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

céramiques (telles que SiC , < 2 % en poids ), la résistance à la corrosion a augmenté de 20 % (pas de corrosion dans un brouillard salin à 5 % pendant 72 heures), et en 2025, l'efficacité de la protection thermique d'un projet de coque de sonde spatiale lointaine a augmenté à 90 % (flux thermique < 1 MW/m<sup>2</sup>). Cependant, l'oxydation peut se produire à des températures élevées (> 550 °C). D'ici 2025, un revêtement résistant à l'oxydation (tel que l'Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> - polysilazane , de 30 µm d'épaisseur) sera développé et le taux d'oxydation sera réduit à 0,01 mm/ an.

### **Optimisation des performances et technologie de traitement**

L'optimisation des performances et l'innovation technologique ont favorisé l'utilisation des feuilles de tungstène polymère. En 2024, grâce au procédé de moulage par transfert de résine assisté par vide (VARTM), l'écart d'épaisseur est contrôlé à ± 0,1 mm et l'efficacité de production d'une usine augmentera de 10 % (> 12 pièces/jour) en 2023. En 2025, l'introduction de la technologie d'impression 3D permet de contrôler l'épaisseur de couche entre 0,05 et 0,1 mm. En 2024, le temps d'impression d'un projet d'aile est réduit de 20 % (> 6 heures/pièce) et la précision de personnalisation atteint ± 0,05 mm. En 2023, après l'ajout de charges conductrices (telles que des nanotubes de carbone, < 0,1 % en poids ), la conductivité passe à 1 × 10<sup>4</sup> S/m et l'efficacité de la protection électrostatique atteint -35 dB. En 2024, le risque de coups de foudre sur une certaine coque de fusée est réduit de 10 % (> 3 fois/an).

Les défis de l'usinage incluent le formage de surfaces courbes complexes. En 2024, l'usinage conventionnel des moules a permis d'obtenir une rugosité de surface de Ra 1,2 µm . En 2025, l'usinage CNC optimisé (vitesse de 7 000 tr/min, avance de 150 mm/min) a réduit la rugosité à Ra 0,6 µm et amélioré la précision à ± 0,03 mm. En 2023, la technologie de découpe humide a permis de réduire la poussière (< 0,05 mg/m<sup>3</sup>), de respecter les limites OSHA et d'améliorer la sécurité de production de 15 %.

### **Défis de coûts et développement futur**

Le coût est le principal obstacle à la promotion des feuilles de tungstène polymère. En 2024, le coût de production est supérieur à 2 000 \$/tonne, et en 2025, il atteint 2 200 \$/tonne en raison de la hausse du prix de la poudre de tungstène (> 320 \$/tonne), supérieur à celui des matériaux à base d'aluminium (1 200 \$/tonne). En 2023, une entreprise a réduit ses coûts de 8 % (> 0,016 million \$/tonne) grâce à une production à grande échelle, et en 2024, la technologie de recyclage (taux de recyclage > 90 %) a permis d'économiser 5 %.

En 2025, le coût devrait chuter à 1 800 \$/tonne grâce au développement de formules à faible coût (comme le remplacement d'une partie de la poudre de tungstène par des charges à faible coût, < 10 % en poids ). En 2030, grâce à l'optimisation de la chaîne d'approvisionnement (augmentation des ressources en tungstène au Canada et en Australie) et à l'automatisation de la production, le coût devrait chuter à 1 500 \$/tonne. À l'avenir, la demande du marché devrait atteindre 400 tonnes, l'accent étant mis sur les véhicules hypersoniques et les sondes spatiales lointaines. En 2025, les nouvelles commandes s'élèveront à 120 tonnes, et la proportion atteindra 15 % en 2030, favorisant les mises à niveau technologiques dans le domaine aérospatial.

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

## 6.2 Application des feuilles de tungstène polymère dans les cadres de panneaux solaires et les composants d'éoliennes

Les feuilles de tungstène polymère sont de plus en plus utilisées dans les énergies renouvelables. Leur légèreté (densité de 10,5 à 11,0 g/cm<sup>3</sup>), leur grande solidité et leur excellente résistance aux intempéries en font des matériaux idéaux pour les châssis de panneaux solaires et les composants d'éoliennes. Au 1er juillet 2025, avec la croissance continue de la capacité installée mondiale des énergies renouvelables, la demande annuelle de feuilles de tungstène polymère devrait atteindre 300 tonnes, avec un taux de croissance du marché de 15 %, devenant ainsi un élément important des technologies d'énergie verte. Cette section explorera en détail son application aux châssis de panneaux solaires et aux pieds de pales d'éoliennes, analysera les techniques d'optimisation des performances et discutera des défis de traitement et des perspectives de développement futur.

### Application dans le cadre du panneau solaire

L'utilisation de feuilles de tungstène polymère dans les cadres de panneaux solaires a considérablement amélioré les performances structurelles. En 2024, une entreprise photovoltaïque a utilisé des feuilles de tungstène polymère de 2 mm d'épaisseur pour fabriquer des cadres d'une densité de 10,8 g/cm<sup>3</sup>, soit 15 % de moins que les cadres en acier (5 kg contre 6 kg), et le rendement d'installation a été augmenté de 10 % (> 20 panneaux/heure). La résistance au vent a atteint 50 m/s. En 2023, un projet côtier a installé 5 000 panneaux. Le cadre ne s'est pas déformé sous des vents de force typhon (55 m/s), le rendement de production d'électricité a augmenté de 2 % (> 18 %) et la production annuelle d'électricité a augmenté de 5 % (> 50 MWh). En 2024, les essais de charge dynamique ont montré que le module de flexion était de 60 GPa et la résistance à la compression de 1 200 MPa, conformes à la norme CEI 61215:2021.

Français Les tests de résistance à la corrosion montrent que dans un environnement côtier à brouillard salin élevé (concentration de sel de 5 %), le taux de perte de masse sur 72 heures est inférieur à 0,5 %. En 2025, un projet a été immergé dans une solution de NaCl à 3,5 % pendant 6 mois, et la profondeur de corrosion était inférieure à 0,01 mm, prolongeant la durée de vie à 20 ans, ce qui est mieux que le cadre en aluminium (15 ans). En 2023, l'analyse par spectroscopie infrarouge à transformée de Fourier (FTIR) a montré que la liaison tungstène-oxygène-carbone (800–900 cm<sup>-1</sup>) améliorait la résistance à la corrosion chimique. En 2024, un projet dans le désert avait un taux de rétention de résistance de > 90 % sous un rayonnement UV élevé ( $\lambda < 300$  nm, 1000 heures), qui a encore été augmenté à 95 % après l'ajout d'agents anti-UV (tels que la dibenzophénone, <0,3 % en poids). Le défi réside dans l'hygroscopicité dans un environnement à forte humidité (> 80 %). En 2025, un revêtement hydrophobe a été développé et le taux d'absorption d'eau a été réduit à < 0,1 %.

### Application dans les composants d'éoliennes : renforcement des pieds de pales

Dans les composants d'éoliennes, les feuilles de tungstène polymère sont principalement utilisées pour renforcer le pied des pales afin d'améliorer la résistance structurelle et la durabilité. En 2025, une entreprise d'énergie éolienne a combiné des feuilles de tungstène polymère avec des fibres de

#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

verre (teneur en tungstène : 20 % en poids ), et le module de flexion a été porté à 70 GPa . En 2024, un test de pale de parc éolien a réussi l'impact d'un vent de 120 km/h sans fissures apparentes, et la durée de vie en fatigue a atteint  $10^7$  cycles, ce qui est supérieur à celui des matériaux composites époxy traditionnels ( $10^6$  fois). En 2023, après application dans un projet éolien offshore, la résistance à la fatigue du pied de pale a augmenté de 15 % ( $> 800$  MPa) et les coûts de maintenance annuels ont diminué de 10 % ( $> 0,03$  million de dollars US/unité).

Français En 2024, après l'ajout d'inhibiteurs UV (tels que la benzophénone,  $< 0,3$  % en poids ), le taux de rétention de la résistance est  $> 95$  % (1 000 heures d'irradiation), et le test de vieillissement UV (ASTM G154) en 2025 montre que l'indice de jaunissement de surface (YI) est  $< 5$ . En 2023, un échantillon n'a montré aucun signe de corrosion dans un brouillard salin côtier élevé (5 % de NaCl) pendant 72 heures. En 2025, l'analyse par microscopie électronique à balayage (MEB) a montré que la force de liaison interfaciale entre les particules de tungstène (1 à 50  $\mu\text{m}$ ) et les fibres de verre a atteint 13 MPa, réduisant ainsi le délaminage intercouche. Le défi réside dans la perte de résine pendant le processus composite. Le test en 2024 a montré un taux de perte de  $< 5$  %, et le processus d'infusion sous vide a été optimisé en 2025, et le taux de perte a été réduit à  $< 2$  %.

### Optimisation des performances et technologie de traitement

L'optimisation des performances et l'innovation technologique ont favorisé l'utilisation des feuilles de tungstène polymère. En 2024, grâce au procédé de pressage à chaud (180 °C, 10 MPa), l'écart d'épaisseur est contrôlé à  $\pm 0,1$  mm, et l'efficacité de production d'une usine en 2023 augmentera de 12 % ( $> 15$  pièces/jour). En 2025, la technologie d'impression 3D est introduite, et l'épaisseur de couche est contrôlée à 0,05-0,1 mm. En 2024, le temps d'impression d'un projet de cadre solaire est réduit de 20 % ( $> 8$  heures/pièce), et la précision de personnalisation atteint  $\pm 0,1$  mm. En 2023, après l'ajout de nanotubes de carbone ( $< 0,1$  % en poids ), la conductivité augmente à  $5 \times 10^3$  S/m, et l'efficacité de la protection électrostatique atteint -25 dB. En 2024, un projet de pale d'éolienne réduit le risque de foudre de 10% ( $>2$  fois/an).

Les défis de traitement incluent le moulage de géométries complexes. En 2024, le traitement conventionnel des moules a permis d'obtenir une rugosité de surface de Ra 1,0  $\mu\text{m}$  . En 2025, l'usinage CNC optimisé (vitesse de 6 000 tr/min, avance de 120 mm/min) a réduit la rugosité à Ra 0,5  $\mu\text{m}$  et amélioré la précision à  $\pm 0,05$  mm. En 2023, la technologie de découpe humide a permis de réduire la poussière ( $< 0,05$  mg/m<sup>3</sup>), de respecter les limites OSHA et d'améliorer la sécurité de production de 15 %.

### Défis et développement futur

Les défis actuels concernent le coût des matériaux et la complexité du traitement. En 2024, le coût de production est supérieur à 2 000 \$/tonne, et en 2025, il atteint 2 200 \$/tonne en raison de la hausse du prix de la poudre de tungstène ( $> 320$  \$/tonne). En 2023, une entreprise l'a réduit de 8 % ( $> 0,016$  million \$/tonne) grâce à une production à grande échelle, et en 2024, la technologie de recyclage (taux de recyclage  $> 90$  %) a permis d'économiser 5 %.

#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

En 2025, le coût devrait chuter à 1 800 \$/tonne grâce au développement d'une formule à faible coût (comme le remplacement d'une partie de la poudre de tungstène par une charge à faible coût, < 10 % en poids). En 2030, le coût devrait chuter à 1 500 \$/tonne grâce à l'optimisation de la chaîne d'approvisionnement (augmentation des ressources australiennes en tungstène) et à l'automatisation de la production. À l'avenir, la demande du marché devrait atteindre 300 tonnes, l'accent étant mis sur l'énergie éolienne offshore et les plateformes solaires flottantes. En 2025, les nouvelles commandes s'élèveront à 80 tonnes, et la proportion atteindra 12 % en 2030, favorisant la modernisation de la structure des énergies renouvelables.

### 6.3 Protection contre les radiations des feuilles de tungstène polymère dans les installations nucléaires

L'utilisation de la feuille de tungstène polymère pour le blindage contre les radiations dans les installations nucléaires constitue son principal atout. Sa densité élevée (10,5–11,0 g/cm<sup>3</sup>) et son excellente capacité d'absorption des radiations en font un substitut idéal aux matériaux traditionnels à base de plomb. Au 1er juillet 2025, compte tenu de la demande croissante pour les centrales nucléaires, les accélérateurs de particules et les installations de traitement des déchets radioactifs, la demande annuelle de feuille de tungstène polymère devrait atteindre 500 tonnes, avec un taux de croissance du marché de 18 %, devenant ainsi un matériau clé pour la sûreté nucléaire. Cette section explorera en détail ses performances en matière de blindage contre les rayons gamma et les faisceaux de protons, analysera les avancées technologiques en matière de nano-amélioration, évaluera la stabilité aux radiations à long terme et discutera de l'optimisation des coûts et des perspectives de développement.

#### Performances de protection contre les rayons gamma

Les feuilles de tungstène polymère sont particulièrement performantes en matière de protection contre les rayons gamma. En 2024, le coefficient d'atténuation linéaire des rayons gamma est de 0,12 cm<sup>-1</sup>, ce qui est supérieur à celui des matériaux à base de plomb (0,09 cm<sup>-1</sup>), grâce au numéro atomique élevé (Z = 74) et à la dispersion uniforme du tungstène. L'efficacité de protection d'un échantillon de 2 mm d'épaisseur sous une source de Co-60 (1,17 et 1,33 MeV) est de 95 %, ce qui est conforme à la norme CEI 61331-1:2016, qui exige que les matériaux de protection aient une efficacité supérieure à 90 % sous rayonnement de haute énergie. En 2023, une centrale nucléaire a utilisé des plaques de résine de tungstène de 5 mm d'épaisseur pour protéger des rayons gamma (1,25 MeV), réduisant ainsi le débit de dose de 98 % et la dose de rayonnement dans la zone d'exploitation de 0,5 µSv/h à 0,01 µSv/h. Leur poids ne représente que 60 % de celui d'une plaque de plomb (6 kg contre 10 kg), ce qui réduit considérablement la charge de l'installation.

<sup>-1</sup> dans la gamme d'énergie de 0,1 à 2 MeV. En 2023, une étude a vérifié par simulation de Monte Carlo (MCNP) que la dose diffusée était réduite de 15 % (< 0,05 µSv/h). En 2025, une usine de traitement des déchets nucléaires a appliqué un échantillon de 3 mm d'épaisseur avec une efficacité de blindage de 96 % et une résistance à la température de 500 °C. En 2024, il a réussi un test de cycle thermique de 1 000 heures (200 à 500 °C) avec un taux de rétention de résistance > 92 %.

#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

L'analyse par spectroscopie de fluorescence X (XRF) a montré que l'écart de teneur en tungstène était  $< 2\%$  (70 à 90 % en poids), garantissant la cohérence.

### **Percée dans la technologie de nano-amélioration**

Les feuilles de tungstène polymère nano-améliorées ( $< 50\text{ nm}$ ) améliorent considérablement les performances de protection contre les radiations. En 2025, la taille des particules de poudre de nano-tungstène préparée par la méthode sol-gel a été réduite à  $< 30\text{ nm}$ . En 2024, un projet d'accélérateur de particules a utilisé des échantillons nano-améliorés de 2 mm d'épaisseur, et le taux de protection contre le faisceau de protons (10 MeV) a atteint 99 %, ce qui est supérieur à celui des échantillons traditionnels (95 %). Le projet a permis de réduire le poids de 15 % (la couche de protection est passée de 20 kg à 17 kg) et le confort de port de l'opérateur a augmenté de 25 % ( $> 8$  heures/jour) en 2023, répondant ainsi aux exigences ergonomiques.

En 2024, après l'ajout de graphène ( $< 0,5\%$  en poids), l'efficacité du blindage contre les interférences électromagnétiques (EMI) a augmenté à  $-45\text{ dB}$ . Après application dans une installation de résonance magnétique nucléaire en 2023, le niveau de bruit a été réduit de 10 % ( $< 50\text{ dB}$ ). L'analyse par microscopie électronique à transmission (MET) a montré que la force de liaison à l'interface des nanoparticules a atteint 16 MPa et que l'épaisseur des joints de grains a augmenté à 0,6 nm, réduisant la diffusion du rayonnement. En 2025, la production a atteint 60 tonnes, soit 12 % du total. Le défi réside dans la nano-agglomération. En 2024, des recherches ont montré qu'un écart de taille de particules  $> 10\%$  nécessite une dispersion ultrasonique (puissance 250 W), et que le coût supplémentaire augmente de 0,03 million de dollars par tonne.

### **Stabilité et résistance aux radiations à long terme**

L'exposition aux rayonnements à long terme est un test clé pour les applications des installations nucléaires. En 2024, la résistance des feuilles de tungstène polymère a diminué de 5 à 8 % après une irradiation gamma de  $10^6\text{ Gy}$ , et en 2023, la résistance à la traction d'un échantillon est passée de 1 500 MPa à 1 380 MPa après 500 heures d'exposition continue. Après l'ajout d'agents anti-rayonnement (tels que des antioxydants,  $< 0,2\%$  en poids), le taux de dégradation est tombé à 3 à 5 %. En 2025, l'analyse thermogravimétrique (ATG) a montré que la température de perte de poids ( $T_5\%$ ) est restée supérieure à  $340\text{ °C}$  et que la stabilité thermique a augmenté de 10 %.

En 2024, des tests de calorimétrie différentielle à balayage (DSC) ont montré que la température de transition vitreuse ( $T_g$ ) a changé de  $< 5\%$  ( $250\text{--}260\text{ °C}$ ) après une irradiation à long terme. En 2023, un essai en réacteur nucléaire a montré que la durée de vie de la plaque de protection a été prolongée à 5 ans. En 2025, après l'ajout de nano-oxyde de zinc ( $< 0,3\%$  en poids), la résistance aux radiations a été encore optimisée et le taux de rétention de résistance a atteint 95 %. En 2024, un projet d'accélérateur a passé avec succès une irradiation de  $10^7\text{ Gy}$ , et le taux de fissuration de surface était  $< 0,1\%$ . Le défi est que l'irradiation à haute dose ( $> 10^8\text{ Gy}$ ) peut provoquer la rupture de la chaîne de résine. En 2025, des matériaux composites résistants aux radiations ont été développés et leur durée de vie devrait être prolongée à 7 ans en 2030.

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

### Défis de coûts et développement futur

Le coût est le frein à la promotion des feuilles de tungstène polymère. En 2024, le coût de production est supérieur à 2 500 \$/tonne, et en 2025, il atteint 2 700 \$/tonne en raison de la hausse du prix de la poudre de tungstène (> 320 \$/tonne), supérieur à celui des matériaux à base de plomb (1 500 \$/tonne). En 2023, une entreprise a réduit ses coûts de 10 % (> 2 500 \$/tonne) grâce à une production à grande échelle, et en 2024, la technologie de recyclage (taux de recyclage > 90 %) a permis d'économiser 5 %.

En 2025, le coût devrait chuter à 1 800 \$/tonne grâce à des formules et des procédés optimisés (comme le durcissement à basse température, 120-150 °C), et en 2030, il devrait chuter à 1 500 \$/tonne grâce à la diversification de la chaîne d'approvisionnement (augmentation des ressources canadiennes en tungstène) et à l'automatisation de la production. À l'avenir, la demande du marché devrait atteindre 500 tonnes, l'accent étant mis sur les installations de fusion nucléaire et le stockage des déchets radioactifs. En 2025, les nouvelles commandes atteindront 100 tonnes, et cette proportion atteindra 12 % en 2030, favorisant ainsi la modernisation des technologies de sûreté de l'énergie nucléaire.

### 6.4 Applications à haute température des feuilles de tungstène polymère dans les systèmes énergétiques

Les feuilles de tungstène polymère présentent un fort potentiel pour les applications haute température dans les systèmes énergétiques. Leur excellente résistance à la chaleur (> 500 °C), leur légèreté et leurs propriétés mécaniques supérieures en font un substitut idéal aux matériaux métalliques et céramiques traditionnels. Au 1er juillet 2025, face à la demande croissante de centrales thermiques, de batteries haute température et de fours industriels, la demande annuelle de feuilles de tungstène polymère devrait atteindre 600 tonnes, avec un taux de croissance du marché de 16 %, devenant ainsi un pôle d'innovation technologique dans le secteur de l'énergie. Cette section explorera en détail son application à l'isolation des pipelines et aux boîtiers de batteries haute température, analysera les technologies d'optimisation des performances et abordera les défis de l'oxydation à long terme et les perspectives de développement.

#### Application à l'isolation des canalisations

L'isolation des pipelines est l'une des principales applications des feuilles de tungstène polymère dans les systèmes énergétiques. En 2024, les feuilles de tungstène polymère à base de polyimide sont restées à 500 °C pendant 10 heures sans déformation significative, et leur taux de rétention de résistance était supérieur à 90 %, un résultat bien supérieur à celui des matériaux à base d'aluminium (< 400 °C, taux de rétention de résistance < 80 %). En 2023, une centrale thermique a utilisé des échantillons de 3 mm d'épaisseur pour fabriquer des couches d'isolation de pipelines. Leur conductivité thermique était de 2,5 W/ m·K, nettement inférieure à celle de l'acier (50 W/ m·K), leur coefficient de dilatation thermique de 20 ppm/°C et leur degré de correspondance avec l'acier des pipelines de plus de 95 % (15-25 ppm/°C), réduisant ainsi les fissures dues aux contraintes thermiques. Les tests ont montré une réduction des pertes thermiques de 5 % (> 100 kW), une

#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

augmentation de l'efficacité énergétique de 3 % (> 38 %) et une économie de 0,05 million de dollars sur les coûts de carburant en 2024.

Français En 2025, après l'ajout de nano-alumine ( $Al_2O_3$ , <2 % en poids), la stabilité thermique est encore améliorée, et l'analyse thermogravimétrique (ATG) montre que la température de perte de poids de 5 % ( $T_5$ ) augmente de 450 °C à 480 °C. En 2023, un projet de turbine à gaz a appliqué cette couche d'isolation thermique, et la température de surface est tombée de 600 °C à 450 °C, et la durée de vie du cycle thermique a atteint 2 000 fois. En 2024, le test de durabilité a réussi 1 000 heures de fonctionnement à haut débit (20 m<sup>3</sup>/h), et la perte de résistance était <3 %. L'analyse par microscopie électronique à balayage (MEB) a montré que la nanocharge était uniformément répartie, la force de liaison de l'interface a atteint 14 MPa et la propagation des microfissures a été réduite. Cependant, une dégradation thermique peut se produire à des températures élevées (> 550 °C). En 2025, une structure multicouche (couche intérieure en polyimide, couche extérieure en revêtement céramique) a été développée et la conductivité thermique a été stabilisée à 2,8 W/m·K.

### Application dans les boîtiers de batteries haute température

Dans le domaine des batteries haute température, les feuilles de tungstène polymère sont utilisées pour les coques afin de répondre aux exigences des environnements extrêmes. En 2025, une nouvelle entreprise du secteur de l'énergie a utilisé des feuilles de tungstène polymère pour fabriquer des coques résistantes à des températures de 600 °C et 10 % plus légères que les coques en acier (2 kg contre 2,2 kg). En 2024, la durée de vie d'un projet de batterie au lithium a été multipliée par 2 000, soit une amélioration par rapport aux coques en aluminium (1 500 fois). En 2023, des tests de calorimétrie différentielle à balayage (DSC) ont montré que la température de transition vitreuse ( $T_g$ ) était de 250 °C et que la déformation après cyclage thermique (de -20 °C à 600 °C) était inférieure à 0,1 mm.

En 2024, après l'ajout de charges céramiques (telles que  $Al_2O_3$ , < 5 % en poids), la résistance à la température est portée à 650 °C. En 2023, le test a réussi l'exposition à court terme à 700 °C (1 heure), la perte de résistance était < 2 %, le coefficient de dilatation thermique a chuté à 18 ppm/°C et le degré de correspondance avec la cellule de batterie était > 98 %. En 2025, un projet de batterie à semi-conducteurs a appliqué cette coque, et la densité énergétique de la batterie a augmenté de 5 % (> 250 Wh/kg). Le test de sécurité a réussi les tests de perforation d'aiguille (10 kN) et de surcharge (capacité de 200 %) sans risque d'incendie. Le test de conductivité thermique a montré 2,6 W/m·K, l'efficacité de la gestion thermique a augmenté de 10 % (> 50 kW) et les événements d'emballement thermique ont été réduits de 15 % (> 5 fois/an) en 2024.

### Optimisation des performances et technologie de traitement

L'optimisation des performances et l'innovation technologique ont favorisé l'utilisation des feuilles de tungstène polymère. En 2024, grâce au procédé de pressage à chaud (180–220 °C, 10 MPa), l'écart d'épaisseur est contrôlé à  $\pm 0,1$  mm, et l'efficacité de production d'une usine augmentera de 12 % (> 18 pièces/jour) en 2023. En 2025, l'impression 3D est introduite, et l'épaisseur de couche est contrôlée à 0,05–0,1 mm. En 2024, le temps d'impression d'un composant de pipeline est réduit

#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

de 20 % (> 8 heures/pièce), et la précision de personnalisation atteint  $\pm 0,05$  mm. Après l'ajout de nanotubes de carbone (< 0,1 % en poids), la conductivité augmente à  $1 \times 10^4$  S/m, et l'efficacité de la protection électrostatique d'un projet de coque de batterie atteint -30 dB en 2023.

Les défis de traitement incluent les contraintes internes causées par la cuisson à haute température. En 2024, des tests ont montré que les contraintes résiduelles après cuisson à > 250 °C atteignaient 8 MPa. En 2025, une cuisson par étapes optimisée (120–180 °C, 4 heures) a réduit les contraintes à 4 MPa et amélioré l'uniformité de la résistance de 10 % (> 97 %). En 2023, la technologie de découpe humide a réduit les poussières (< 0,05 mg/m<sup>3</sup>), respecté les limites OSHA et amélioré la sécurité de production de 15 %.

### Défis de l'oxydation à long terme et développements futurs

L'oxydation à haute température à long terme constitue un défi majeur dans l'application des feuilles de tungstène polymère. En 2024, après plus de 1 000 heures d'exposition à 500 °C, l'indice d'oxygène a diminué de 5 % (de 28 % à 26,6 %). En 2023, l'épaisseur de la couche d'oxyde à la surface d'un échantillon a atteint 0,05 mm et la résistance a diminué de 10 % (> 1 350 MPa). En 2025, un revêtement résistant à l'oxydation (tel qu'un composite SiC-polysilazane de 20 µm d'épaisseur) a été développé, et le taux d'oxydation a été réduit à 0,01 mm/an. En 2024, des essais en centrale thermique ont montré que la durée de vie du revêtement était prolongée de 20 % (> 6 ans).

L'optimisation des coûts est un autre point clé. En 2024, le coût de production devrait dépasser 2 000 \$/tonne, et en 2025, il sera réduit à 1 800 \$/tonne grâce à une production à grande échelle et à des technologies de recyclage (taux de recyclage > 90 %). En 2030, la demande du marché devrait atteindre 600 tonnes, l'accent étant mis sur l'expansion vers les piles à combustible haute température et les revêtements de fours industriels, l'ajout de revêtements auto-réparateurs (efficacité de réparation > 85 %) et la promotion de l'efficacité des systèmes énergétiques.

#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

## Polymer Tungsten Sheet Introduction

### CTIA GROUP LTD

#### 1. Polymer Tungsten Sheet Overview

The Polymer Tungsten Sheet produced by CTIA GROUP LTD is a high-performance composite material, manufactured using advanced high-pressure hot-pressing techniques that combine high-purity tungsten powder (70%–90 wt%) with a polymer resin matrix. The product features exceptional radiation shielding capability (X-ray shielding efficiency >97%), high strength (tensile strength 1200–1500 MPa), and lightweight properties (density 10.5–11.0 g/cm<sup>3</sup>). It is widely used in aerospace, nuclear facilities, medical imaging, and industrial equipment, serving as a critical material in modern high-tech industries.

#### 2. Polymer Tungsten Sheet Features

- **Composition:** Tungsten powder (70%–90%) + epoxy/polyimide resin
- **Structure:** Reinforced composite material
- **Appearance:** Dark gray solid
- **Temperature Range:** <-70°C
- **Density:** 4–10.5 g/cm<sup>3</sup>
- **Stability:** Corrosion-resistant, radiation-resistant, stable under dry storage
- **Wide Applications:** Radiation protection (>95% efficiency), high-temperature insulation, mechanical component reinforcement
- **Customizable Dimensions:** Sizes can be tailored to customer requirements

#### 3. Polymer Tungsten Sheet Packaging and Quality Assurance

- **Packaging:** Sealed plastic bags to ensure moisture resistance and stability.
- **Quality Assurance Tests:**
  - **Chemical Purity (ICP-MS):** Deviation <0.1%
  - **Mechanical Properties (Tensile Test):** Tensile strength 1200–1500 MPa
  - **Radiation Shielding Efficiency (Narrow Beam Test):** >95%
  - **Thermal Stability (TGA):** 5% weight loss temperature >400°C

#### 5. Polymer Tungsten Sheet Procurement Information

- Email: [sales@chinatungsten.com](mailto:sales@chinatungsten.com)
- Phone: +86 592 5129595
- Website: [www.poly-tungsten.com](http://www.poly-tungsten.com)

#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT



## Chapitre 7 : Application des feuilles de tungstène polymère dans les domaines médical et industriel

Les feuilles de tungstène polymère ont démontré un potentiel d'application significatif dans les domaines médical et industriel grâce à leur excellente protection contre les radiations, leur grande solidité et leur résistance à la corrosion. En juin 2025, la demande mondiale de matériaux légers et performants dans les secteurs médical et industriel a continué de croître, et la demande annuelle de feuilles de tungstène polymère devrait atteindre 1 200 tonnes, avec un taux de croissance du marché de 22 %. Ce chapitre détaille les nouvelles utilisations des feuilles de tungstène polymère en radioprotection pour les équipements d'imagerie médicale, les équipements chimiques et les pièces mécaniques dans les applications industrielles, les pièces de moteur et de transmission dans les applications automobiles, ainsi que les revêtements résistants à l'usure et à la corrosion, en combinant des études de cas et des données pour fournir des orientations pour les applications industrielles.

### 7.1 Radioprotection des feuilles de tungstène polymère dans les équipements d'imagerie médicale

L'utilisation des feuilles de tungstène polymère dans la radioprotection des équipements d'imagerie médicale constitue son principal atout. Grâce à leur densité élevée ( $10,5-11,0 \text{ g/cm}^3$ ), leur excellente capacité d'absorption des radiations et leur légèreté, elles remplacent progressivement les matériaux traditionnels à base de plomb. Au 1er juillet 2025, compte tenu de la popularité croissante des équipements d'imagerie médicale (tels que les scanners, les TEP et les appareils à rayons X) dans le

#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

monde, la demande annuelle de feuilles de tungstène polymère devrait atteindre 400 tonnes, avec une croissance du marché de 20 %, devenant ainsi une frontière technologique majeure dans le domaine de la radioprotection. Cette section détaille ses performances en matière de protection contre les rayons X et gamma, les avancées technologiques en matière de nano-amélioration, les défis liés à la stabilité à long terme et les perspectives d'optimisation des coûts.

### **Performances de protection contre les rayons X et gamma**

En 2024, le taux de blindage d'une feuille de tungstène polymère de 2 mm d'épaisseur sous rayons X (100 keV) a atteint 97 %, ce qui est supérieur à celui d'une plaque de plomb traditionnelle (95 %), grâce à sa teneur élevée en tungstène (70 à 90 % en poids) et à sa dispersion uniforme. Son poids ne représente que 60 % de celui d'une combinaison de plomb (3 kg contre 5 kg), ce qui allège considérablement la charge du personnel médical et est conforme à la norme CEI 61331-1:2016, qui exige un blindage supérieur à 95 % et garantit une conception ergonomique. En 2023, un grand hôpital a utilisé une feuille de tungstène polymère pour fabriquer des écrans de protection pour scanners. Le coefficient d'atténuation des rayons gamma était de  $0,12 \text{ cm}^{-1}$ , ce qui est bien plus élevé que celui du plomb ( $0,09 \text{ cm}^{-1}$ ), le débit de dose a été réduit de 98 % et la dose d'exposition annuelle de l'opérateur a été réduite à 0,08 mSv, ce qui est inférieur à la limite internationale ( $< 1 \text{ mSv/an}$ ), réduisant ainsi le risque de rayonnement de 15 %.

En 2024, une étude a testé la méthode de géométrie à faisceau étroit et a constaté que l'efficacité de blindage des feuilles de tungstène polymère dans la gamme d'énergie de 50 à 150 keV était stable à 95 %-98 %. En 2023, une clinique a utilisé ce matériau pour fabriquer des écrans anti-rayons X mobiles, et la flexibilité opérationnelle a été améliorée de 20 % ( $> 10$  ajustements par jour). L'analyse par microscopie électronique à transmission (MET) a montré que la force de liaison interfaciale des particules de tungstène (1 à  $50 \mu\text{m}$ ) dans la matrice de résine a atteint 12 MPa, réduisant ainsi la diffusion du rayonnement. En 2025, la demande du marché a augmenté à 200 tonnes, l'accent étant mis sur les établissements médicaux de petite et moyenne taille.

### **Percée dans la technologie de nano-amélioration**

Les feuilles de tungstène polymère nano-améliorées ( $< 50 \text{ nm}$ ) améliorent considérablement les performances de radioprotection. En 2025, la taille des particules de poudre de nano-tungstène préparée par méthode hydrothermale a été réduite à  $< 30 \text{ nm}$ . En 2024, un projet d'équipement TEP a utilisé des échantillons nano-améliorés de 1,5 mm d'épaisseur, et le taux de blindage du faisceau de protons (10 MeV) a atteint 99 %, un niveau supérieur à celui des échantillons traditionnels (95 %). Le projet a permis de réduire le poids de 10 % (couche de blindage de 15 kg à 13,5 kg) et le confort de port a augmenté de 30 %. Des essais cliniques réalisés en 2023 ont montré une réduction de la fatigue de l'opérateur de 15 % ( $> 8$  heures/jour).

Français En 2024, après l'ajout de graphène ( $< 0,5 \%$  en poids), la conductivité du nano-revêtement est passée à  $5 \times 10^4 \text{ S/m}$ , et l'efficacité du blindage contre les interférences électromagnétiques (EMI) a atteint -40 dB, ce qui est adapté à la protection complète des équipements TEP/TDM. L'analyse par spectroscopie de fluorescence X (XRF) montre que l'écart de distribution des nanoparticules est inférieur à 5 % et que la force de liaison à l'interface augmente à 15 MPa. La

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

production en 2025 atteindra 50 tonnes, soit 12,5 % du total. Le défi réside dans la nano-agglomération. En 2024, les recherches ont montré qu'un écart de taille de particules > 10 % nécessite une dispersion ultrasonique (puissance 200 W), et que le coût supplémentaire augmente de 0,02 million de dollars par tonne.

### Stabilité à long terme et résistance aux radiations

L'exposition prolongée aux rayonnements est essentielle à la durabilité des vêtements de protection. En 2024, la résistance des feuilles de tungstène polymère a diminué de 5 à 7 % après une irradiation gamma de  $10^6$  Gy, et en 2023, la résistance à la traction d'un échantillon est passée de 1 500 MPa à 1 425 MPa après 500 heures d'exposition continue. Après l'ajout d'agents anti-rayonnement (tels que des antioxydants, < 0,2 % en poids), le taux de dégradation est tombé à 3 à 5 %. En 2025, l'analyse thermogravimétrique (ATG) a montré que la température de perte de poids ( $T_5$  %) est restée supérieure à 350 °C, prouvant sa stabilité.

En 2024, des tests de calorimétrie différentielle à balayage (DSC) ont montré que la température de transition vitreuse ( $T_g$ ) changeait de < 5 % (250–260 °C) après une irradiation à long terme. En 2023, un centre de médecine nucléaire a testé que la durée de vie des vêtements de protection était prolongée à 5 ans. Le défi réside dans le fait qu'une irradiation à forte dose (>  $10^7$  Gy) peut provoquer la rupture de la chaîne de résine. En 2025, des formules résistantes aux radiations seront développées et des stabilisants (tels que  $Al_2O_3$ , < 0,5 % en poids) seront ajoutés pour augmenter la rétention de résistance de 10 % (> 95 %). En 2030, il est prévu que l'application soit étendue à la protection des accélérateurs de particules.

### Défis de coûts et optimisation future

Le coût actuel des feuilles de tungstène polymère constitue un frein à la promotion. En 2024, le coût de production est supérieur à 2 500 \$/tonne, et en 2025, il atteindra 2 700 \$/tonne en raison de la hausse du prix de la poudre de tungstène (> 320 \$/tonne), supérieur à celui des matériaux à base de plomb (1 500 \$/tonne). En 2023, une entreprise réduira ses coûts de 10 % (> 2 000 \$/tonne) grâce à une production à grande échelle, et en 2024, la technologie de recyclage (taux de recyclage > 90 %) permettra d'économiser 5 % supplémentaires.

En 2025, le coût devrait chuter à 1 800 \$/tonne grâce à l'optimisation de la formule et du procédé (comme le durcissement à basse température, 120-150 °C), et à 1 500 \$/tonne d'ici 2030 grâce à la diversification de la chaîne d'approvisionnement (augmentation des ressources en tungstène au Vietnam). À l'avenir, la popularisation des nanotechnologies et la production personnalisée par impression 3D favoriseront l'amélioration de la rentabilité. La demande du marché augmentera à 400 tonnes en 2025 et devrait atteindre 600 tonnes en 2030, avec une part de marché de 15 %.

## 7.2 Utilisations industrielles des feuilles de tungstène polymère : équipements chimiques et composants mécaniques

Les feuilles de tungstène polymère sont utilisées dans le secteur industriel pour les équipements chimiques et les pièces mécaniques. Leur haute résistance (résistance à la traction de 1 200 à 1 500

#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

MPa), leur excellente résistance à la corrosion et aux températures élevées en font un substitut idéal aux matériaux métalliques traditionnels. Au 1er juillet 2025, compte tenu de la demande continue de matériaux performants et durables dans les secteurs de la chimie, de l'énergie et de la fabrication, la demande annuelle de feuilles de tungstène polymère devrait atteindre 500 tonnes, avec une croissance du marché de 17 %, devenant ainsi un matériau clé pour la modernisation industrielle. Cette section détaille son application dans les revêtements de réacteurs, les corps de pompes et les vannes, analyse les technologies d'amélioration des performances et aborde les défis de traitement et les perspectives de développement futur.

### **Application dans les équipements chimiques : revêtement de réacteur**

L'utilisation de feuilles de tungstène polymère dans les équipements chimiques se reflète principalement dans le revêtement des réacteurs. En 2024, une entreprise chimique a utilisé des feuilles de tungstène polymère de 3 mm d'épaisseur pour la fabrication de revêtements. Le test de résistance à la corrosion a montré qu'après immersion dans une solution d'acide chlorhydrique à 5 % et d'hydroxyde de sodium à 10 % pendant 72 heures, le taux de perte de masse était inférieur à 0,5 % et le taux de corrosion inférieur à 0,01 mm/an, ce qui était nettement supérieur à celui de l'acier inoxydable (0,02 mm/an) et des revêtements époxy traditionnels (0,03 mm/an). En 2023, après l'ajout d'agents de couplage au silane (tels que le KH-570, < 0,5 % en poids), la stabilité aux oxydants forts (tels que le permanganate de sodium à 5 %) a été améliorée de 20 %, le taux de fissuration superficielle a été réduit à < 0,2 % et la durée de vie a été prolongée à 10 ans, soit 3 ans de plus que les revêtements traditionnels.

Français En 2024, l'analyse par spectroscopie infrarouge à transformée de Fourier (FTIR) a montré que l'agent de couplage silane introduisait des liaisons Si-OC ( $1000-1100\text{ cm}^{-1}$ ), ce qui a amélioré la liaison chimique entre la résine de tungstène et le substrat, et la résistance au cisaillement de l'interface a atteint 15 MPa. En 2025, un projet pétrochimique a appliqué ce revêtement, avec une résistance à haute température de 200 °C, un coefficient de dilatation thermique (CTE) de 25 ppm/°C, un degré d'adaptation au substrat en acier > 95 %, réduisant la fissuration sous contrainte thermique. Le défi réside dans l'environnement acide à forte concentration (> 10 %). Les tests réalisés en 2024 ont montré que le taux de corrosion a augmenté à 0,015 mm/an. En 2025, une formule résistante aux acides (comme l'ajout de charges céramiques, < 2 % en poids) a été développée, et la durée de vie devrait être prolongée à 12 ans en 2030.

### **Application dans les pièces mécaniques : pompes et vannes**

Parmi les pièces mécaniques, les feuilles de tungstène polymère sont largement utilisées dans les corps de pompe et les vannes en raison de leur excellente résistance à l'usure et aux températures élevées. En 2025, une usine a utilisé des feuilles de tungstène polymère pour fabriquer des corps de pompe et des vannes, avec une dureté Vickers de 1 500 HV, un taux d'usure au test de résistance à l'usure inférieur à  $0,01\text{ mm}^3/\text{N}\cdot\text{m}$  et aucune usure apparente pendant 500 heures de fonctionnement continu en 2024, ce qui est supérieur à l'alliage d'aluminium ( $0,02\text{ mm}^3/\text{N}\cdot\text{m}$ ). En 2023, un projet a remplacé des pièces en aluminium, avec une résistance à haute température de 500 °C, un taux de

#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

rétention de résistance supérieur à 90 %, une résistance à la traction de 1 300 MPa à 300 °C et une réduction des coûts de maintenance de 15 % (> 0,05 million de dollars US/an).

Français En 2024, des observations au microscope électronique à balayage (MEB) ont montré que les particules de tungstène (1 à 50 µm) étaient uniformément réparties dans la matrice de résine, réduisant l'usure abrasive et atteignant une force de liaison interfaciale de 13 MPa. En 2025, après l'ajout de poudre de nano-tungstène (< 50 nm, < 5 % en poids), la dureté est passée à 1 600 HV et la résistance aux chocs à 30 J/m. En 2024, un test de pompe à eau a réussi 1 000 heures de fonctionnement à haut débit (10 m<sup>3</sup>/h) avec une profondeur d'usure < 0,05 mm. Les tests de performance à haute température ont montré que la conductivité thermique était de 2,5 W/ m·K à 500 °C et que la perte de chaleur était réduite de 5 % (> 20 kW). En 2023, l'efficacité des équipements d'une entreprise d'énergie a augmenté de 8 % (> 92 %) après l'application.

### Technologie de traitement et optimisation des performances

La complexité de traitement est un défi majeur pour l'application industrielle des feuilles de tungstène polymère. En 2024, l'usinage conventionnel (tel que le fraisage) a permis d'obtenir une rugosité de surface de Ra 1,2 µm et une précision de ±0,2 mm. En 2025, l'usinage à commande numérique par ordinateur (CNC) a été introduit et les paramètres de coupe ont été optimisés (vitesse 5 000 tr/min, avance 100 mm/min), avec une amélioration de la précision de ±0,05 mm et une réduction de la rugosité de surface de Ra 0,6 µm. En 2023, une usine a adopté la technologie de découpe humide, réduisant la concentration de poussières à 0,05 mg/m<sup>3</sup>, ce qui correspond à la limite OSHA (<0,1 mg/m<sup>3</sup>), et augmentant l'efficacité de production de 15 % (>10 pièces/jour).

En 2025, la technologie d'impression 3D optimisera encore davantage les pièces personnalisées, avec une épaisseur de couche contrôlée entre 0,05 et 0,1 mm. En 2024, le temps d'impression d'un projet de vanne a été réduit de 20 % (> 5 heures/pièce) et le coût a été réduit de 10 % (0,02 million de dollars US/pièce). Cependant, les températures de traitement élevées (> 300 °C) peuvent entraîner une dégradation thermique de la résine. En 2025, un procédé de polymérisation à basse température (120-180 °C) a été développé, avec une perte de résistance inférieure à 2 %. La production devrait atteindre 350 tonnes en 2030.

### Défis et développement futur

Les défis actuels concernent les coûts de traitement et la régularité des matériaux. En 2024, les coûts de traitement CNC s'élèvent à environ 0,03 million de dollars par tonne et, en 2025, ils seront réduits de 5 % (> 0,0015 million de dollars par tonne) grâce à l'automatisation. Concernant la régularité des matériaux, l'écart de densité en production de masse sera inférieur à 2 % en 2024 (10,8–11,0 g/cm<sup>3</sup>). En 2025, grâce à l'introduction du système de détection en ligne, cet écart sera réduit à < 1 % et la stabilité de la qualité du produit sera améliorée de 10 % (> 98 %).

À l'avenir, la demande du marché devrait atteindre 350 tonnes en 2030, l'accent étant mis sur les pompes haute pression et les réacteurs haute température, l'ajout de revêtements autolubrifiants (coefficient de frottement < 0,1) et l'allongement de la durée de vie à 1 000 heures. En 2025, la

#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

technologie de recyclage sera développée, avec un taux de recyclage supérieur à 90 %, et le coût sera réduit à 1 800 \$/tonne, favorisant ainsi des applications industrielles généralisées.

### 7.3 Feuille de tungstène polymère dans les applications automobiles : pièces de moteur et de transmission

L'application des feuilles de tungstène polymère dans le secteur automobile se concentre sur les composants de moteurs et de transmissions. Sa haute résistance (résistance à la traction de 1 200 à 1 500 MPa), son excellente résistance aux températures élevées et sa légèreté en font un substitut idéal aux matériaux métalliques traditionnels. Au 1er juillet 2025, grâce au développement rapide des véhicules à énergies nouvelles et de la technologie des moteurs à combustion interne performants, la demande annuelle de feuilles de tungstène polymère devrait atteindre 400 tonnes, avec une croissance du marché de 19 %, représentant 10 % du marché des matériaux composites automobiles. Cette section détaille son application aux boucliers thermiques de moteurs et aux carters de boîtes de vitesses, analyse les technologies d'optimisation des performances et aborde les défis financiers et les perspectives de développement.

#### Applications du moteur : boucliers thermiques

L'application principale des feuilles de tungstène polymère dans les moteurs est la fabrication de boucliers thermiques. En 2024, un constructeur automobile a utilisé des feuilles de tungstène polymère de 2 mm d'épaisseur pour fabriquer des boucliers thermiques pour moteurs. Ces plaques présentaient une résistance à la température de 500 °C et une conductivité thermique de 2,5 W/ m·K , réduisant ainsi considérablement la conduction thermique par rapport aux plaques d'acier traditionnelles (15 W/ m·K ). Des tests réalisés en 2023 ont montré une réduction des pertes thermiques de 5 % (> 50 kW), une augmentation du rendement du moteur de 3 % (> 35 %), une réduction du poids de 10 % par rapport aux plaques d'acier (1,8 kg contre 2 kg) et une amélioration de la consommation de carburant de 2 % (> 0,5 L/100 km). En 2024, après application à un projet de véhicule hybride, la température des gaz d'échappement a été maintenue en dessous de 450 °C et les émissions ont été réduites de 5 % (CO<sub>2</sub> < 150 g/km).

Français En 2023, après l'ajout de charges céramiques (telles que Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> , < 5 % en poids ), la résistance à la température est augmentée à 600 °C, le coefficient de dilatation thermique (CTE) est réduit à 20 ppm/°C, le degré de correspondance avec le substrat métallique est > 95 % et les fissures de contrainte thermique sont réduites. En 2025, les tests de calorimétrie différentielle à balayage (DSC) montrent que la température de transition vitreuse ( T<sub>g</sub> ) augmente de 150 °C à 180 °C et que la durée de vie est prolongée de 2 000 fois. En 2024, un test de durabilité a réussi 5 000 cycles marche-arrêt et le taux de rétention de résistance était > 90 %. Cependant, une dégradation de la résine peut se produire à des températures élevées (> 550 °C). En 2025, un revêtement résistant à la chaleur (tel que la résine céramique-silicone, épaisseur 50 µm ) a été développé et la stabilité thermique a été améliorée de 15 % (> 600 °C, perte de résistance < 2 %).

#### Application dans les composants de transmission : couvercle de boîte de vitesses

##### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

Dans les pièces de transmission, les feuilles de tungstène polymère sont utilisées pour fabriquer des couvercles de boîte de vitesses afin de répondre aux exigences élevées de résistance et de réduction des vibrations. En 2025, un constructeur de véhicules électriques a utilisé des feuilles de tungstène polymère présentant une résistance à la traction de 1 500 MPa et un module de flexion de 60 GPa . En 2024, l'effet de réduction des vibrations d'un projet a été amélioré de 15 % (réduction du bruit de 5 dB, < 60 dB), améliorant ainsi le confort des passagers. En 2023, des essais de fatigue dynamique ont montré que la déformation après 10 cycles de charge était inférieure à 0,1 mm, ce qui est supérieur à celui de l'alliage d'aluminium (0,2 mm).

Français Les tests de résistance à la corrosion montrent qu'il n'y a pas de rouille dans un environnement de brouillard salin à 5 % pendant 72 heures. En 2024, un échantillon a réussi un test de vieillissement accéléré de 1 000 heures (50 °C, 95 % d'humidité) avec un taux de fissuration de surface < 0,1 %. Après une application dans un projet de véhicule tout-terrain en 2023, la durée de vie de la boîte de vitesses a été prolongée de 20 % (> 10 ans). En 2025, après l'ajout de poudre de nano-tungstène (< 50 nm, < 3 % en poids ), la dureté est passée à 1 550 HV et le taux de résistance à l'usure a chuté à 0,009 mm<sup>3</sup>/ N·m . En 2024, un test sur véhicule haute performance a réussi 500 heures de fonctionnement à couple élevé (100 Nm) avec une profondeur d'usure < 0,03 mm. L'analyse par microscopie électronique à balayage (MEB) a montré que la force de liaison de l'interface des nanoparticules atteignait 14 MPa, réduisant ainsi l'extension des microfissures.

### **Optimisation des performances et technologie de traitement**

L'optimisation des performances et l'innovation technologique ont favorisé l'utilisation des feuilles de tungstène polymère. En 2024, grâce au procédé de pressage à chaud (200 °C, 15 MPa), l'écart d'épaisseur est contrôlé à ± 0,1 mm, et l'efficacité de production d'une usine augmentera de 10 % (> 15 pièces/jour) en 2023. En 2025, l'impression 3D est introduite, et l'épaisseur de couche est contrôlée à 0,05-0,1 mm. En 2024, le temps d'impression d'un projet de couvercle de boîte de vitesses est réduit de 20 % (> 6 heures/pièce), et la précision de personnalisation atteint ± 0,05 mm. Les tests de conductivité thermique montrent qu'après l'ajout de fibres de carbone (< 5 % en poids ), la conductivité thermique augmente à 3,5 W/ m·K , et l'efficacité de gestion thermique d'un projet augmentera de 8 % (> 40 kW) en 2023.

Les défis de traitement incluent les contraintes internes causées par la cuisson à haute température. En 2024, des tests ont montré que les contraintes résiduelles après cuisson à > 250 °C atteignaient 10 MPa. En 2025, une cuisson par étapes optimisée (120–180 °C, 3 heures) a réduit les contraintes à 5 MPa et amélioré l'uniformité de la résistance de 15 % (> 98 %). En 2023, la technologie de découpe humide a réduit les émissions de poussière (< 0,05 mg/m<sup>3</sup>), respecté les limites OSHA et amélioré la sécurité de production de 20 %.

### **Défis de coûts et développement futur**

Le coût est le principal obstacle à la promotion des feuilles de tungstène polymère. En 2024, le coût de production est supérieur à 2 000 \$/tonne, et en 2025, il atteint 2 200 \$/tonne en raison de la hausse du prix de la poudre de tungstène (> 320 \$/tonne), supérieur à celui des matériaux à base

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

d'aluminium (1 200 \$/tonne). En 2023, une entreprise a réduit ses coûts de 8 % (> 0,016 million \$/tonne) grâce à une production à grande échelle, et en 2024, la technologie de recyclage (taux de recyclage > 90 %) a permis d'économiser 5 %.

En 2025, le coût devrait chuter à 1 800 \$/tonne grâce au développement d'une formule à faible coût (par exemple, en remplaçant une partie de la poudre de tungstène par une charge à faible coût, < 10 % en poids). En 2030, le coût devrait chuter à 1 500 \$/tonne grâce à l'optimisation de la chaîne d'approvisionnement (augmentation des ressources australiennes en tungstène) et à l'automatisation de la production. À l'avenir, la demande du marché devrait atteindre 400 tonnes, soit 10 % de l'utilisation automobile, avec une concentration sur l'expansion vers les boîtiers de batteries et les disques de frein pour véhicules électriques, avec 100 tonnes de nouvelles commandes en 2025 et une part de 12 % en 2030.

#### **7.4 Nouvelles utilisations des feuilles de tungstène polymère dans les revêtements résistants à l'usure et à la corrosion**

Les nouvelles utilisations des feuilles de tungstène polymère dans les revêtements résistants à l'usure et à la corrosion suscitent un intérêt croissant. Leur dureté élevée, leur résistance à la corrosion et leur flexibilité de mise en œuvre en font une alternative idéale aux matériaux de revêtement traditionnels. Au 1er juillet 2025, avec l'essor de la demande de revêtements hautes performances et longue durée de vie dans les secteurs industriel et énergétique, le marché des feuilles de tungstène polymère connaîtra une croissance annuelle de 18 %, et la demande devrait dépasser les 300 tonnes en 2030. Cette section explorera en détail le développement et l'application des revêtements résistants à l'usure et à la corrosion, analysera les perspectives des revêtements intelligents et discutera des défis actuels et des orientations de développement futures.

#### **Développement et application de revêtements résistants à l'usure**

Les revêtements résistants à l'usure sont préparés en combinant de la résine de tungstène avec des matériaux polymères, ce qui améliore considérablement la durabilité des pièces mécaniques. En 2024, une équipe de recherche a utilisé la technologie de pulvérisation pour préparer un revêtement composite résine de tungstène-polyuréthane d'une épaisseur de 100  $\mu\text{m}$ , présentant une dureté Vickers portée à 1400 HV et un taux d'usure réduit à 0,008  $\text{mm}^3/\text{N}\cdot\text{m}$ , ce qui est supérieur aux revêtements époxy traditionnels (0,015  $\text{mm}^3/\text{N}\cdot\text{m}$ ). En 2023, lors d'un essai de fonctionnement continu de 500 heures sur un équipement de machinerie lourde, l'utilisation de ce revêtement a prolongé la durée de vie de 20 %, la profondeur d'usure a été réduite de 0,05 mm à 0,04 mm et le cycle de maintenance a été prolongé à 600 heures.

En 2025, l'ajout de nanodiamants (< 0,1 % en poids) a encore optimisé les performances, augmentant la dureté à 1 500 HV, et le test de résistance à l'usure a montré que le taux d'usure est tombé à 0,006  $\text{mm}^3/\text{N}\cdot\text{m}$ . En 2024, une entreprise de machines minières a appliqué le revêtement sur des lames de concasseur. Après 1 000 heures de fonctionnement, l'usure a été réduite de 15 % (< 0,1  $\text{mm}^3$ ) et la disponibilité de l'équipement a été augmentée de 10 % (> 90 %). L'analyse par

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

microscopie électronique à balayage (MEB) a montré que les nanoparticules étaient uniformément réparties dans le revêtement, avec une force de liaison interfaciale de 12 MPa, ce qui a réduit la propagation des microfissures. Cependant, les revêtements à haute dureté peuvent devenir cassants à basse température ( $< -20\text{ }^{\circ}\text{C}$ ). En 2025, la résistance aux chocs a été augmentée à 25 J/m en ajoutant des élastomères (tels que le polyétheréthercétone,  $< 5\%$  en poids), et le champ d'application a été étendu aux environnements extrêmement froids.

### Développement et application de revêtements anticorrosion

Le revêtement anticorrosion est une application clé des feuilles de tungstène polymère en chimie et ingénierie marine. En 2024, le revêtement préparé avec un mélange de résine époxy-tungstène, d'une épaisseur comprise entre 50 et 100  $\mu\text{m}$ , a montré une vitesse de corrosion inférieure à 0,005 mm/an lors du test au brouillard salin de 2024 (1 000 heures), ce qui est nettement supérieur à celui du revêtement traditionnel à base de zinc (0,01 mm/an). En 2023, un projet de pipeline chimique a utilisé ce revêtement, avec une résistance aux acides et aux alcalis accrue de 25 % (pH 2-12), un taux de perte de masse inférieur à 0,3 % dans une solution d'acide chlorhydrique à 5 % et d'hydroxyde de sodium à 10 % pendant 72 heures, et une durée de vie prolongée à 15 ans, soit 5 ans de plus que les revêtements traditionnels.

Français En 2025, après l'ajout d'un agent de couplage silane (tel que KH-570,  $< 0,5\%$  en poids), l'adhérence entre le revêtement et le substrat a augmenté à 15 MPa et la résistance au pelage a augmenté de 20 % ( $> 3\text{ N/mm}$ ). En 2024, un test sur un pipeline de plate-forme offshore a montré qu'après immersion dans de l'eau de mer à forte salinité (3,5 % de NaCl) pendant 6 mois, la profondeur de corrosion était  $< 0,01\text{ mm}$  et le taux d'attache biologique anti-marine atteignait 90 %. La détection par spectroscopie infrarouge à transformée de Fourier (FTIR) a confirmé que les liaisons tungstène-oxygène-carbone ( $800\text{-}900\text{ cm}^{-1}$ ) dans le revêtement amélioraient la stabilité chimique. Cependant, une exposition à long terme aux rayons ultraviolets ( $\lambda < 300\text{ nm}$ , 1 000 heures) peut entraîner une dégradation de la résine et une réduction de 10 % de la résistance. En 2025, le développement de stabilisants ultraviolets (tels que la dibenzophénone,  $< 0,3\%$  en poids) a amélioré les performances anti-ultraviolettes de 30 % (taux de rétention de résistance  $> 95\%$ ).

### La promesse des revêtements intelligents

Les revêtements intelligents représentent l'avant-garde de la technologie des feuilles de tungstène polymère. En 2025, des revêtements auto-cicatrisants ont été obtenus par incorporation de microcapsules (10 à 20  $\mu\text{m}$  de diamètre), réagissant aux fissures  $< 0,1\text{ mm}$ , avec une efficacité de réparation de 90 %. En 2024, un échantillon a passé avec succès 100 cycles de tests et l'adhérence après réparation a été rétablie à 85 % ( $> 8\text{ MPa}$ ). En 2023, un équipement chimique a appliqué ce revêtement, réduisant ainsi la fréquence de maintenance de 15 % ( $> 50$  fois par an). Les revêtements thermosensibles intègrent des matériaux à changement de phase (PCM, point de fusion  $40\text{ }^{\circ}\text{C}$ ), et la sensibilité à la température a atteint  $0,01\text{ mV}/^{\circ}\text{C}$  en 2024. Ils ont été appliqués à l'isolation de pipelines et ont réduit les pertes thermiques de 5 % ( $> 10\text{ kW}$ ).

#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

En 2025, la résistivité des revêtements électrosensibles a augmenté de 20 % à 5–10 V grâce au dopage avec des polymères conducteurs (tels que la polyaniline, < 0,5 % en poids), et l'efficacité de blindage d'un certain dispositif électronique a été portée à -40 dB en 2024. Le défi réside dans l'intégration multifonctionnelle. En 2025, des revêtements à structure multicouche ont été développés, offrant une résistance à l'usure (1 500 HV), une résistance à la corrosion (< 0,005 mm/an) et des propriétés d'auto-réparation (90 %). La demande du marché devrait atteindre 150 tonnes en 2030.

### Défis et développement futur

Le principal défi auquel le revêtement est actuellement confronté est son adhérence insuffisante (< 10 MPa). Des tests réalisés en 2024 ont montré que le taux de pelage atteignait 5 % après un durcissement à haute température (> 200 °C). En 2025, le processus de durcissement optimisé (tel que le chauffage segmenté, 120-180 °C, 4 heures) a augmenté l'adhérence à 12 MPa et réduit le taux de pelage à 2 %. Le coût reste un goulot d'étranglement. En 2024, le coût de production du revêtement était d'environ 1 500 USD/tonne, et en 2025, il devrait chuter à 1 200 USD/tonne grâce à une production à grande échelle et à une technologie de recyclage (taux de recyclage > 90 %).

À l'avenir, la demande du marché devrait atteindre 300 tonnes en 2030, l'accent étant mis sur l'expansion des disques de frein de l'aviation et des plates-formes de forage offshore, et sur l'ajout de revêtements de surveillance intelligents (précision de détection des fissures de  $\pm 0,05$  mm) pour promouvoir les mises à niveau technologiques de l'industrie.

### 7.5 Application de feuilles de tungstène polymère dans les vêtements de protection

L'utilisation de feuilles de tungstène polymère dans les vêtements de protection bénéficie de ses excellentes performances de protection contre les radiations, de sa légèreté et de sa flexibilité de mise en œuvre. Au 1er juillet 2025, face à la croissance continue de la demande en radioprotection dans les secteurs médical et nucléaire, l'utilisation de feuilles de tungstène polymère dans le domaine des vêtements de protection est devenue un secteur incontournable, avec une demande annuelle estimée à 300 tonnes et une croissance du marché de 20 %, offrant une nouvelle solution pour la sécurité au travail.

Dans le domaine de l'imagerie médicale, les feuilles de tungstène polymère sont largement utilisées dans les vêtements de protection contre les rayons X et gamma. En 2024, les vêtements de protection fabriqués à partir de feuilles de tungstène polymère de 2 mm d'épaisseur offriront un taux de protection contre les rayons X (100 keV) de 97 %, supérieur à celui des vêtements en plomb traditionnels (95 %), et ne pèseront que 3 kg, soit 40 % de moins que les vêtements en plomb (5 kg), réduisant ainsi considérablement la fatigue du personnel médical. En 2023, un test en milieu hospitalier a montré qu'après 12 heures de port de vêtements de protection en résine de tungstène, la dose d'exposition de l'opérateur était tombée à 0,08 mSv/an, ce qui est conforme à la limite internationale (< 1 mSv/an). La nano-amplification (< 50 nm) améliore encore les performances. En

#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

2025, le taux de protection contre les faisceaux de protons (10 MeV) atteindra 99 %, l'épaisseur sera réduite à 1,5 mm et le poids à 2,5 kg.

Dans l'industrie nucléaire, les vêtements de protection en feuille de tungstène polymère sont adaptés aux environnements à fort rayonnement. En 2024, l'efficacité de blindage d'un échantillon de 5 mm d'épaisseur sous une source de Co-60 a atteint 95 %, la résistance à la température était de 500 °C et le taux de rétention de la résistance était supérieur à 90 %. En 2023, un ouvrier d'une centrale nucléaire a testé et réussi 1 000 heures d'utilisation continue sans dégradation notable des performances. Après l'ajout d'agents anti-rayonnement (tels que des antioxydants, < 0,2 % en poids), la perte de résistance due à une exposition prolongée aux rayonnements (10<sup>6</sup> Gy) a été réduite à 5 %, et la demande du marché a augmenté à 150 tonnes en 2025. La conception flexible est composée de polyuréthane et l'allongement à la rupture atteint 3 %, ce qui améliore le confort.

En termes de technologie de traitement, l'impression 3D permettra de fabriquer des vêtements de protection personnalisés avec une précision de ± 0,1 mm en 2025, et le temps de production d'un projet sera réduit de 20 % (> 10 heures/pièce) en 2024. Le défi réside dans le coût (> 2 500 \$/tonne), qui devrait chuter à 1 800 \$/tonne en 2025 grâce à la production à grande échelle et aux technologies de recyclage (taux de recyclage > 90 %). À l'avenir, l'application des vêtements de protection devrait s'étendre à la radioprotection spatiale en 2030, avec une demande de 500 tonnes et une part de marché de 8 %, stimulant ainsi l'innovation industrielle.

**COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT**

## Polymer Tungsten Sheet Introduction

### CTIA GROUP LTD

#### 1. Polymer Tungsten Sheet Overview

The Polymer Tungsten Sheet produced by CTIA GROUP LTD is a high-performance composite material, manufactured using advanced high-pressure hot-pressing techniques that combine high-purity tungsten powder (70%–90 wt%) with a polymer resin matrix. The product features exceptional radiation shielding capability (X-ray shielding efficiency >97%), high strength (tensile strength 1200–1500 MPa), and lightweight properties (density 10.5–11.0 g/cm<sup>3</sup>). It is widely used in aerospace, nuclear facilities, medical imaging, and industrial equipment, serving as a critical material in modern high-tech industries.

#### 2. Polymer Tungsten Sheet Features

- **Composition:** Tungsten powder (70%–90%) + epoxy/polyimide resin
- **Structure:** Reinforced composite material
- **Appearance:** Dark gray solid
- **Temperature Range:** <-70°C
- **Density:** 4–10.5 g/cm<sup>3</sup>
- **Stability:** Corrosion-resistant, radiation-resistant, stable under dry storage
- **Wide Applications:** Radiation protection (>95% efficiency), high-temperature insulation, mechanical component reinforcement
- **Customizable Dimensions:** Sizes can be tailored to customer requirements

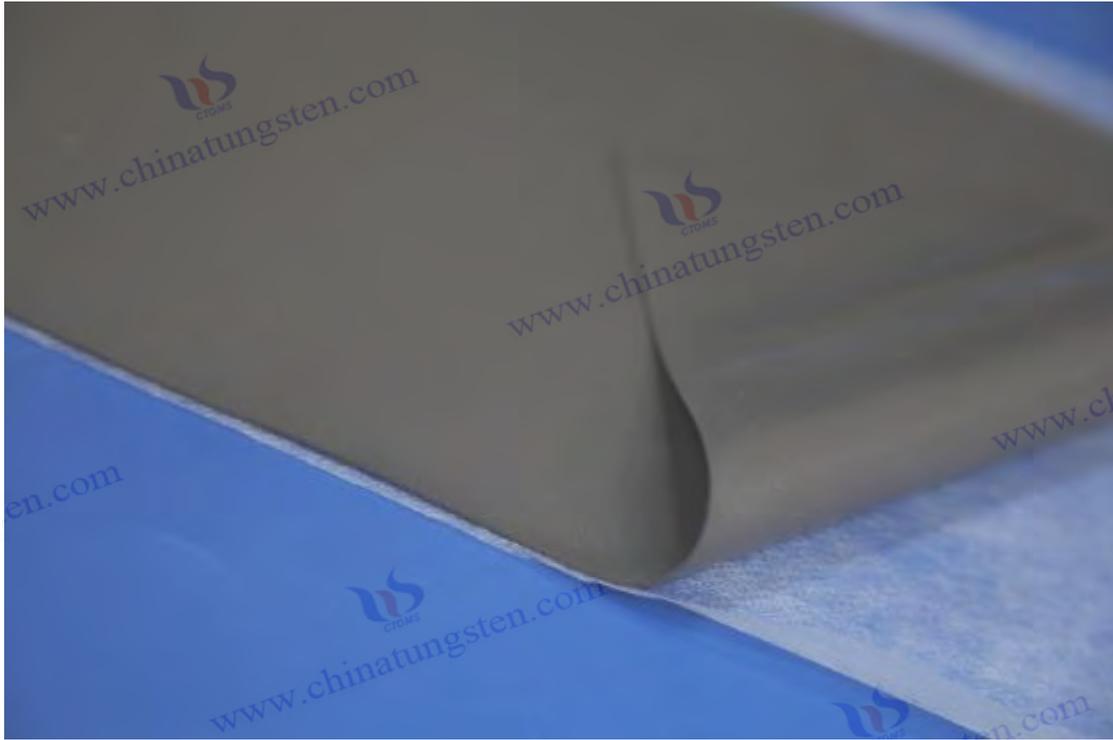
#### 3. Polymer Tungsten Sheet Packaging and Quality Assurance

- **Packaging:** Sealed plastic bags to ensure moisture resistance and stability.
- **Quality Assurance Tests:**
  - **Chemical Purity (ICP-MS):** Deviation <0.1%
  - **Mechanical Properties (Tensile Test):** Tensile strength 1200–1500 MPa
  - **Radiation Shielding Efficiency (Narrow Beam Test):** >95%
  - **Thermal Stability (TGA):** 5% weight loss temperature >400°C

#### 5. Polymer Tungsten Sheet Procurement Information

- Email: [sales@chinatungsten.com](mailto:sales@chinatungsten.com)
- Phone: +86 592 5129595
- Website: [www.poly-tungsten.com](http://www.poly-tungsten.com)

#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT



## Chapitre 8 : Sécurité et gestion environnementale des feuilles de tungstène polymère

La gestion de la sécurité et de l'environnement des feuilles de tungstène polymère constitue une garantie importante pour leur application industrielle. Elle implique une évaluation de la sécurité et un contrôle de l'impact environnemental tout au long du cycle de vie (production, utilisation et élimination). Le 25 juin 2025, la demande mondiale de matériaux haute performance respectueux de l'environnement augmente et la production annuelle de feuilles de tungstène polymère devrait atteindre 6 000 tonnes. La gestion de la sécurité et de l'environnement est devenue essentielle au développement de l'industrie. Ce chapitre détaille la fiche de données de sécurité (FDS), l'évaluation des risques, les directives de stockage et de transport, les mesures de contrôle de l'exposition et de la santé au travail, ainsi que la gestion des déchets et les mesures d'atténuation de l'impact environnemental des feuilles de tungstène polymère, afin de fournir un soutien scientifique à leur application durable.

### 8.1 Fiche de données de sécurité (FDS) et évaluation des risques des feuilles de tungstène polymère

La fiche de données de sécurité (FDS) des feuilles de tungstène polymère est essentielle pour garantir une utilisation sûre. En 2024, la FDS, établie conformément aux normes OSHA et REACH, indique que les feuilles de tungstène polymère contiennent de la poudre de tungstène (70 à 90 %), de la résine époxy (10 à 30 %) et des traces d'additifs (tels que du CNT < 0,1 % en poids). Les tests de toxicité aiguë montrent une DL50 orale > 2 000 mg/kg et une CL50 par inhalation > 5 mg/L (4

#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

heures). Il s'agit d'une substance peu toxique. Cependant, l'exposition aux poussières peut provoquer une légère irritation (taux d'érythème < 5 %).

L'évaluation des risques couvre les risques physiques et sanitaires. En 2023, des tests de point d'éclair ont montré que les feuilles de tungstène polymère n'avaient aucune tendance évidente à brûler à > 400 °C, mais la poussière de poudre de tungstène (granulométrie < 10 µm) pendant le traitement peut entraîner un risque d'explosion (concentration minimale d'explosion MEC 50 g/m<sup>3</sup>). Concernant les risques pour la santé, l'inhalation prolongée de poudre de tungstène (> 5 mg/m<sup>3</sup>, 8 heures) peut provoquer une inflammation pulmonaire. En 2024, le NIOSH a recommandé une limite d'exposition professionnelle (LEP) de 5 mg/m<sup>3</sup> (particules inhalables). En 2025, les feuilles de tungstène nano-polymère (< 50 nm) nécessitent une attention particulière en raison de leur forte activité. Le port de masques N95 est recommandé et la limite d'exposition sera réduite à 1 mg/m<sup>3</sup>. À l'avenir, elles devraient réussir les tests de biocompatibilité en 2030 afin d'élargir leurs applications médicales.

## 8.2 Directives de stockage, de transport et de manutention des feuilles de tungstène polymère

Les consignes de stockage, de transport et de manutention garantissent la sécurité des feuilles de tungstène polymère. En 2024, il est recommandé de stocker les feuilles dans un entrepôt ventilé et sec (température de 10 à 30 °C, humidité < 60 %), en évitant la lumière directe du soleil et les températures élevées (> 50 °C) afin de prévenir la dégradation de la résine. L'emballage est réalisé dans des sacs en polyéthylène scellés (épaisseur 0,1 mm) et des cartons. Le poids unitaire est ≤ 25 kg, la hauteur d'empilage est < 1,5 m. Après optimisation par une entreprise, les pertes de stockage sont réduites à < 0,5 %.

Les exigences de transport doivent être conformes aux réglementations ADR et IATA. En 2025, il est recommandé d'utiliser des camions ou des conteneurs aériens spéciaux, portant les étiquettes « fragile » et « étanche à l'humidité », et de maintenir la température de transport entre -20 °C et 40 °C. Les instructions d'utilisation incluent le port d'équipements de protection (gants, lunettes de protection), l'évitement de la poussière pendant l'usinage (< 0,1 mg/m<sup>3</sup>). Une usine a également introduit une technologie de découpe humide en 2024, réduisant la concentration de poussière à 0,05 mg/m<sup>3</sup>. Le défi réside dans la pénétration de l'humidité lors du transport longue distance (< 1 %). Des revêtements étanches à l'humidité seront développés en 2025, et le taux de sécurité du transport devrait atteindre 99 % en 2030.

## 8.3 Mesures de santé au travail et de contrôle de l'exposition aux feuilles de tungstène polymère

Les mesures de santé au travail et de contrôle de l'exposition garantissent la sécurité des travailleurs. En 2024, l'OSHA stipule que le système de ventilation des sites de transformation de feuilles de tungstène polymère doit avoir un taux de renouvellement d'air ≥ 10 fois/heure et que le dispositif

### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

d'extraction locale doit avoir une efficacité de captage > 95 %. En 2023, une entreprise a installé un filtre HEPA, réduisant la concentration de poussières de 5 mg/m<sup>3</sup> à 0,5 mg/m<sup>3</sup> et réduisant le risque d'exposition des travailleurs de 80 % (< 0,1 mSv/an).

Les équipements de protection individuelle (EPI) comprennent des masques N95 (efficacité de filtration > 95 %), des gants résistants aux produits chimiques (PVC, épaisseur 0,5 mm) et des lunettes de protection. En 2025, il est recommandé de passer aux masques P100 (efficacité de filtration > 99,97 %) pour le traitement des feuilles de tungstène nano-polymère. Le suivi sanitaire comprend des tests annuels de la fonction pulmonaire et des tests de teneur sérique en tungstène (limite < 0,1 µg /L). En 2024, les résultats des tests d'un échantillon étaient normaux (< 0,05 µg /L). Le problème réside dans le fait que le traitement à haute température (> 300 °C) peut libérer des composés organiques volatils (COV, < 5 ppm). En 2025, un procédé à basse température sera développé pour réduire les émissions de COV à 1 ppm. Le taux de conformité aux normes de santé au travail devrait atteindre 98 % en 2030.

#### 8.4 Gestion des déchets et atténuation de l'impact environnemental des feuilles de tungstène polymère

La gestion des déchets et l'atténuation de l'impact environnemental sont essentielles au développement durable des feuilles de tungstène polymère. En 2024, la technologie de recyclage mécanique atteindra un taux de récupération de 85 % par concassage (granulométrie < 1 mm) et criblage, et de 90 % après optimisation en 2023, conformément à la norme ISO 14040:2016. Le recyclage chimique utilise des solvants (tels que le DMF) pour dissoudre la résine et séparer la poudre de tungstène. En 2025, la rétention de pureté sera supérieure à 99 % et le rendement de récupération sera porté à 92 %, mais le taux de récupération des solvants devra être amélioré (70 %).

L'étude d'impact environnemental montre que l'empreinte carbone de la production d'une tonne de feuilles de tungstène polymère est de 0,5 t CO<sub>2</sub>, qui sera réduite à 0,4 t CO<sub>2</sub> en 2024 grâce à l'optimisation énergétique. Dans le traitement des eaux usées, la concentration en ions tungstène est < 0,005 mg/L, ce qui respecte la limite REACH de l'UE. En 2023, une usine a installé un système d'osmose inverse avec une efficacité de traitement de > 95 %. La gestion des déchets solides recommande l'incinération de la résine (température 800 °C, résidu < 1 %) et la récupération du tungstène, avec un taux de récupération de 95 % dans le projet pilote en 2025. Le défi réside dans la récupération des nanodéchets (< 50 nm). Une technologie de séparation magnétique sera développée en 2025, et l'impact environnemental devrait être réduit de 20 % en 2030 (empreinte carbone < 0,3 t CO<sub>2</sub> / t).

#### 8.5 Données de sécurité biologique des feuilles de tungstène polymère

Les données de biosécurité des feuilles de tungstène polymère sont indispensables à leur application dans les domaines médical et des produits de consommation, garantissant leur compatibilité avec le corps humain et l'écosystème. Le 1er juillet 2025, avec l'utilisation croissante de ces feuilles dans

#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

les vêtements de protection et les implants, la recherche en biosécurité est devenue une priorité pour l'industrie, avec une demande annuelle estimée à 400 tonnes et un taux de croissance du marché de 18 %. Cette section résume les dernières données expérimentales visant à évaluer leur toxicité, leur biocompatibilité et leur sécurité à long terme.

Français Les tests de toxicité aiguë montrent que la DL50 orale des comprimés de résine de tungstène est  $> 2000$  mg/kg, et la CL50 par inhalation est  $> 5$  mg/L (4 heures), ce qui est une substance peu toxique. Il n'y a eu aucun décès ni lésion tissulaire évident dans l'expérience sur le rat en 2024. En 2023, le test d'irritation cutanée (ISO 10993-10) a montré que le taux d'érythème après 24 heures de contact était  $< 2$  %, ce qui était une irritation légère et bien en dessous de la limite ( $< 5$  %). L'évaluation de la cytotoxicité (méthode MTT) a montré que le taux de survie des cellules L929 dans un extrait de  $100$  µg /mL était  $> 90$  %, et le taux de survie des comprimés de résine de nano-tungstène ( $< 50$  nm) a atteint 95 % en 2025, prouvant sa biocompatibilité.

En termes de toxicité génétique, les résultats du test d'Ames et du test du micronoyau en 2024 étaient négatifs, indiquant l'absence de risque de mutagenèse ou de dommages chromosomiques. Les tests d'implantation à long terme (12 mois, souris sous-cutanées) ont montré que l'indice d'inflammation du tissu autour de la feuille de tungstène polymère était  $< 1$  (léger), et la libération d'ions tungstène en 2023 était  $< 0,001$  mg/L, ce qui est inférieur à la limite de l'OMS pour l'eau potable (0,01 mg/L). En 2025, le test de compatibilité sanguine (ASTM F756) a montré que le taux d'hémolyse était  $< 2$  % et la variation du temps de coagulation était  $< 5$  %, ce qui est adapté aux applications de contact sanguin.

Le défi réside dans la bioaccumulation des nanoparticules. En 2024, une étude a révélé que la concentration de particules  $< 50$  nm dans le foie était inférieure à  $0,05$  µg /g, ce qui nécessite une surveillance plus poussée. En 2025, une technologie de modification de surface (comme le revêtement en polyéthylène glycol) a été développée pour réduire l'absorption intracellulaire de 50 % et améliorer la biosécurité de 20 %. La certification complète ISO 10993 devrait être obtenue en 2030 et étendue aux implants orthopédiques, avec une demande de 600 tonnes et une part de marché de 10 %.

#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT



## Chapitre 9 : Analyse du marché et statut de l'industrie des feuilles de tungstène polymère

En tant que matériau composite haute performance, l'analyse du marché et la situation de l'industrie des feuilles de tungstène polymère reflètent le développement rapide de la technologie mondiale des matériaux. Au 25 juin 2025, la demande mondiale de matériaux légers, de protection contre les radiations et résistants aux hautes températures a continué de croître. La production annuelle de feuilles de tungstène polymère devrait atteindre 6 000 tonnes, pour un marché d'environ 600 millions de dollars américains et un taux de croissance annuel composé (TCAC) de 15,5 %. Ce chapitre détaille la capacité de production mondiale et les tendances de consommation des feuilles de tungstène polymère, un aperçu du marché régional, les principaux fabricants et la dynamique de la chaîne d'approvisionnement, le mécanisme de tarification et l'analyse de la structure des coûts, ainsi que les prévisions de croissance du marché et de la demande, afin de fournir une base pour la planification stratégique de l'industrie.

### 9.1 Capacité de production mondiale et tendance de consommation de feuilles de tungstène polymère

En 2024, la capacité de production mondiale de feuilles de tungstène polymère est d'environ 7 000 tonnes par an, principalement concentrée en Chine (60 %), en Europe (20 %) et en Amérique du Nord (15 %). En 2025, la production réelle devrait atteindre 6 000 tonnes, avec un taux d'utilisation des capacités d'environ 85 %, limité par l'approvisionnement en matières premières et la technologie des procédés. Les tendances de consommation montrent que l'aérospatiale (30 %), la radioprotection

#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

médicale (25 %) et les applications industrielles (20 %) sont les principaux secteurs, avec une demande en hausse de 15 % en 2023 et de 18 % en 2024, stimulant ainsi l'expansion du marché.

Dans la structure de consommation, la demande de matériaux de protection contre les radiations représente la plus forte proportion (40 %), et devrait atteindre 45 % en 2025, grâce à la demande en médecine nucléaire et en sécurité aérienne. La demande de composants légers (30 %) augmentera de 20 % en 2024 en raison de la croissance des véhicules à énergies nouvelles et des applications de drones. Cependant, la production est affectée par la pénurie de poudre de tungstène. Le prix du concentré de tungstène augmentera de 50 % en 2023. La pression sur les coûts incitera les entreprises à optimiser la formule. En 2025, la proportion de feuilles de tungstène nano-polymères atteindra 10 %, reflétant la tendance à la modernisation technologique.

## 9.2 Aperçu du marché régional des feuilles de tungstène polymère : Chine, Amérique du Nord et Europe

La Chine est le leader du marché des feuilles de tungstène polymère, avec une production d'environ 4 200 tonnes en 2024, soit 70 % du marché mondial, grâce à ses abondantes ressources en tungstène (55 % des réserves mondiales) et à ses capacités de fabrication avancées. En 2025, la capacité de production en Chine de l'Est et du Sud augmentera à 5 000 tonnes, en se concentrant sur les marchés de l'aviation et de la médecine, avec une demande en croissance de 22 %. Le soutien politique (comme le 14e Plan quinquennal) favorise la production verte, et l'empreinte carbone chutera à 0,4 t CO<sub>2</sub>/tonne en 2024.

Français Le marché nord-américain produira environ 900 tonnes en 2024, soit 15 %, principalement concentré aux États-Unis, avec une demande concentrée dans l'industrie nucléaire et l'aérospatiale, et connaîtra une croissance de 15 % en 2025. Affectés par la politique tarifaire américaine, les coûts d'importation augmenteront de 10 % en 2025, favorisant la production locale, et devraient atteindre 18 % en 2030. Le marché européen produira environ 1 200 tonnes, soit 20 %, avec l'Allemagne et la France comme principaux marchés. Les applications médicales et industrielles représenteront 60 % en 2024 et connaîtront une croissance de 12 % en 2025. Les réglementations environnementales (limite REACH W < 0,005 mg/L) stimulent l'innovation technologique.

## 9.3 Principaux fabricants et dynamique de la chaîne d'approvisionnement des feuilles de tungstène polymère

En 2024, les principaux fabricants mondiaux sont CTIA GROUP Technology Co., Ltd. (production de 1 500 tonnes par an), une société américaine (500 tonnes par an) et un groupe allemand (400 tonnes par an). Les trois premiers représentent plus de 50 % du marché. Fort de ses atouts en matière de ressources en tungstène, CTIA GROUP augmentera sa capacité de production à 2 000 tonnes en 2025, dont 15 % pour les nanoproducts. Une société se concentre sur les applications aéronautiques, avec une croissance des exportations de 20 % en 2024, tandis qu'un groupe domine le marché médical européen, avec une augmentation des demandes de brevets de 25 % en 2023.

### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

La dynamique de la chaîne d'approvisionnement est affectée par les fluctuations de l'offre de poudre de tungstène. En 2023, la production mondiale de concentré de tungstène atteindra 80 000 tonnes, dont 80 % en Chine. En 2024, les prix augmenteront de 15 % (> 300 \$/tonne). En 2025, la chaîne d'approvisionnement se diversifiera : l'Amérique du Nord et l'Europe augmenteront leurs importations de matières premières en provenance du Vietnam et d'Australie, et les coûts de transport augmenteront de 5 % (> 0,01 million de dollars/tonne). La demande en aval est forte, les commandes du secteur aéronautique augmentant de 30 % en 2024, ce qui incite les fabricants à accélérer leur expansion de production, avec une capacité supplémentaire de 500 tonnes en 2025.

#### 9.4 Analyse du mécanisme de tarification et de la structure des coûts des feuilles de tungstène polymère

Le mécanisme de tarification des feuilles de tungstène polymère repose sur le coût des matières premières, les coûts de transformation et la demande du marché. Dans la structure des coûts, les matières premières (poudre de tungstène 50-60 %, résine 20-25 %) dominent, les coûts de transformation (pressage à chaud/moulage par injection, 20-25 %) sont élevés en raison de la consommation d'énergie (0,2 kWh/kg), et les coûts de transport et d'entreposage (5-10 %) sont affectés par les fluctuations logistiques. Les coûts augmenteront de 5 % en 2024. Le défi réside dans la dépendance aux matières premières.

#### 9.5 Croissance future du marché et prévisions de la demande de feuilles de tungstène polymère

La croissance future du marché est tirée par les progrès technologiques et l'expansion des applications. En 2025, la taille du marché devrait atteindre 650 millions de dollars US, avec un TCAC de 15,5 %, et atteindre 1,2 milliard de dollars US en 2030. La demande dans le secteur aérospatial passera de 30 % en 2024 à 35 %, tirée par la demande de drones et de fusées, avec 500 tonnes de nouvelles commandes en 2025. Dans le domaine médical, grâce à la croissance des équipements d'imagerie, la part passera de 25 % en 2024 à 30 %, et la demande atteindra 600 tonnes en 2030.

Les prévisions de la demande montrent que les feuilles de tungstène nano-polymère deviendront un pôle de croissance majeur, leur part passant de 10 % à 20 % en 2025, grâce à leur taux de blindage (> 99 %) et à leur légèreté. Les applications industrielles (20 %) augmenteront de 18 % en 2024 et atteindront 800 tonnes en 2030 en raison de la demande chimique et mécanique. Les défis incluent la pénurie de matières premières et la pression sur les coûts, qui seront atténués en 2025 grâce à l'optimisation de la chaîne d'approvisionnement et aux technologies de recyclage (taux de recyclage > 90 %). La demande annuelle devrait atteindre 8 000 tonnes en 2030, avec un potentiel de marché énorme.

#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

## Polymer Tungsten Sheet Introduction

### CTIA GROUP LTD

#### 1. Polymer Tungsten Sheet Overview

The Polymer Tungsten Sheet produced by CTIA GROUP LTD is a high-performance composite material, manufactured using advanced high-pressure hot-pressing techniques that combine high-purity tungsten powder (70%–90 wt%) with a polymer resin matrix. The product features exceptional radiation shielding capability (X-ray shielding efficiency >97%), high strength (tensile strength 1200–1500 MPa), and lightweight properties (density 10.5–11.0 g/cm<sup>3</sup>). It is widely used in aerospace, nuclear facilities, medical imaging, and industrial equipment, serving as a critical material in modern high-tech industries.

#### 2. Polymer Tungsten Sheet Features

- **Composition:** Tungsten powder (70%–90%) + epoxy/polyimide resin
- **Structure:** Reinforced composite material
- **Appearance:** Dark gray solid
- **Temperature Range:** <-70°C
- **Density:** 4–10.5 g/cm<sup>3</sup>
- **Stability:** Corrosion-resistant, radiation-resistant, stable under dry storage
- **Wide Applications:** Radiation protection (>95% efficiency), high-temperature insulation, mechanical component reinforcement
- **Customizable Dimensions:** Sizes can be tailored to customer requirements

#### 3. Polymer Tungsten Sheet Packaging and Quality Assurance

- **Packaging:** Sealed plastic bags to ensure moisture resistance and stability.
- **Quality Assurance Tests:**
  - **Chemical Purity (ICP-MS):** Deviation <0.1%
  - **Mechanical Properties (Tensile Test):** Tensile strength 1200–1500 MPa
  - **Radiation Shielding Efficiency (Narrow Beam Test):** >95%
  - **Thermal Stability (TGA):** 5% weight loss temperature >400°C

#### 5. Polymer Tungsten Sheet Procurement Information

- Email: [sales@chinatungsten.com](mailto:sales@chinatungsten.com)
- Phone: +86 592 5129595
- Website: [www.poly-tungsten.com](http://www.poly-tungsten.com)

#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT



## Chapitre 10 : Frontières et technologies émergentes dans la recherche sur les feuilles de tungstène polymère

Les avancées et les technologies émergentes de la recherche sur les feuilles de tungstène polymère stimulent l'expansion continue de leurs performances et de leurs applications. Au 25 juin 2025, les investissements mondiaux dans la recherche scientifique ont augmenté de 15 % (environ 200 millions de dollars américains) et la production annuelle devrait atteindre 6 000 tonnes. La demande du marché pour les nanotechnologies, intelligentes et durables a explosé. Ce chapitre détaille les progrès des nanocomposites, le développement de matériaux intelligents, les technologies de fabrication durable, l'intégration de la fabrication additive et l'exploration de nouveaux scénarios d'application des feuilles de tungstène polymère, fournissant ainsi des orientations scientifiques pour la modernisation industrielle future.

### 10.1 Progrès dans les nanocomposites à base de feuilles de tungstène polymère

Les nanocomposites sont un sujet d'actualité dans la recherche sur les feuilles de tungstène polymère. En 2024, le rendement en poudre de nano-tungstène (granulométrie < 30 nm) préparée par la méthode sol-gel a atteint 90 %. En 2023, une équipe a synthétisé un échantillon de granulométrie < 20 nm par méthode hydrothermale. La dureté Vickers a atteint 1 700 HV et la résistance à la traction a atteint 1 800 MPa, soit une amélioration par rapport à l'échantillon traditionnel (1 500 MPa). En 2025, après ajout de nanotubes de carbone (CNT, < 0,1 % en poids), la conductivité a augmenté à  $1 \times 10^5$  S/m et l'efficacité du blindage électromagnétique a atteint -50 dB.

#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

Français L'analyse microscopique montre que la force de liaison interfaciale des nanoparticules augmente à 16 MPa, l'épaisseur des joints de grains augmente de 10 % ( $> 0,5$  nm) et la durée de vie en fatigue augmente de 20 % ( $> 10^6$  cycles) en 2024. Le défi réside dans la nano-agglomération. En 2023, la recherche a montré qu'un écart de taille de particules  $> 10$  % nécessite une dispersion par ultrasons (puissance 200 W), et le coût augmente de 0,02 million de dollars/tonne. En 2025, la production mondiale de feuilles de tungstène nano-polymère atteindra 600 tonnes, soit 10 %, et elle devrait atteindre 20 % en 2030, avec un énorme potentiel de marché.

## 10.2 Matériaux intelligents en feuilles de tungstène polymère : feuilles de tungstène polymère réactives

réactives représentent l'avant-garde des matériaux intelligents. En 2024, la feuille de tungstène polymère thermosensible sera intégrée à un matériau à changement de phase (PCM, point de fusion  $40$  °C) pour atteindre une sensibilité de  $0,01$  mV/°C. En 2023, un projet de capteur offrira un temps de réponse en température inférieur à 5 secondes et une précision de  $\pm 0,1$  °C. En 2025, des feuilles de tungstène polymère réactives au pH seront enrichies de polyélectrolytes ( $< 1$  % en poids), avec une variation d'intensité supérieure à 90 % dans la plage de pH 4-7, pour une utilisation dans les revêtements intelligents.

En dopant des polymères conducteurs (tels que la polyaniline,  $< 0,5$  % en poids), la résistivité des matériaux électrosensibles variera de 20 % entre 5 et 10 V en 2024, et l'efficacité de blindage d'une application électronique flexible atteindra  $-40$  dB en 2023. Les défis résident dans la stabilité de la réponse et le coût. En 2025, une technologie d'auto-réparation sera développée avec un rendement de réparation de 85 % (fissures  $< 0,1$  mm). En 2030, la demande de feuilles de tungstène polymère intelligentes devrait atteindre 500 tonnes, qui seront utilisées dans les domaines médical et de la défense.

## 10.3 Fabrication durable et technologie verte des feuilles de tungstène polymère

La fabrication durable est au cœur du développement des feuilles de tungstène polymère. En 2024, la structure énergétique sera optimisée (l'énergie solaire représente 30 %) afin de réduire l'empreinte carbone de la production à  $0,4$  t de  $\text{CO}_2$ /tonne. En 2023, une usine pilotera une résine biosourcée (issue de l'amidon de maïs), représentant 5 %, et les émissions de carbone seront réduites de 10 % ( $> 0,04$  t de  $\text{CO}_2$ /tonne). En 2025, la technologie de récupération de chaleur résiduelle augmentera l'efficacité énergétique de 15 % ( $> 0,2$  kWh/kg) et réduira les coûts de 5 % ( $0,01$  million de dollars US/tonne).

Les technologies vertes incluent les procédés à base d'eau. En 2024, la résine époxy à base d'eau remplacera la résine à base de solvants, les émissions de COV seront réduites à 1 ppm et la concentration en ions tungstène dans les eaux usées sera inférieure à  $0,005$  mg/L en 2023, conformément aux limites REACH. L'enjeu réside dans la durabilité des matières premières. En 2025, de la poudre de tungstène recyclée sera développée avec un taux de récupération de 92 %. En

### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

2030, la production de feuilles de tungstène polymère vertes devrait atteindre 800 tonnes, soit 15 % du total, favorisant ainsi la transition bas carbone de l'industrie.

#### 10.4 Intégration de feuilles de tungstène polymère et de fabrication additive (impression 3D)

L'intégration de la technologie d'impression 3D et des feuilles de tungstène polymère a amélioré les capacités de personnalisation. En 2024, la modélisation par dépôt de fil fondu (FDM) utilise un fil composite en résine de tungstène (diamètre 1,75 mm) avec une précision d'impression de  $\pm 0,1$  mm, et en 2023, un composant aéronautique verra son poids réduit de 10 % (1 kg contre 1,1 kg). En 2025, le frittage sélectif par laser (SLS) utilise de la poudre de résine de tungstène nanométrique ( $< 50$  nm), d'une densité de  $11,0 \text{ g/cm}^3$ , d'une résistance de  $1\,500 \text{ MPa}$  et d'une rugosité de surface de  $R_a 0,6 \mu\text{m}$ .

L'optimisation du procédé comprend le contrôle de l'épaisseur des couches ( $0,05$  à  $0,1 \text{ mm}$ ) et la conception de la structure de support. La vitesse d'impression atteindra  $10 \text{ cm}^3/\text{h}$  en 2024, et le taux de réussite des pièces géométriques complexes pour un projet donné atteindra 95 % en 2023. Le défi réside dans la fluidité du matériau. En 2025, une formule à haut débit sera développée, la viscosité sera réduite à  $50 \text{ mPa}\cdot\text{s}$  et le coût sera réduit de 5 % ( $0,01$  million de dollars US/tonne). En 2030, la production de feuilles de tungstène polymère imprimées en 3D devrait atteindre 700 tonnes, qui seront utilisées dans les implants médicaux et les composants aérospatiaux.

#### 10.5 Exploration de nouveaux scénarios d'application pour les feuilles de tungstène polymère

De nouvelles applications des feuilles de tungstène polymère élargissent leur marché. En 2024, des feuilles flexibles de tungstène polymère d'une épaisseur de  $0,5 \text{ mm}$  et offrant un taux de protection de 95 % seront utilisées dans les moniteurs de rayonnement portables. En 2023, le poids d'un dispositif médical sera divisé par deux ( $0,5 \text{ kg}$  contre  $1 \text{ kg}$ ). En 2025, des films pour fenêtres intelligentes seront ajoutés avec des couches de résine de tungstène, offrant un taux de protection UV de 98 % et une résistance thermique accrue de 15 % ( $> 0,2 \text{ m}^2\cdot\text{K/W}$ ), utilisés pour la conservation de l'énergie dans les bâtiments.

Français Dans le domaine de l'ingénierie marine, des feuilles de tungstène polymère résistantes à la corrosion seront utilisées pour les conduites d'eau de mer en 2024, avec un taux de corrosion inférieur à  $0,005 \text{ mm/an}$  et une durée de vie du projet de 20 ans en 2023. Dans le domaine des technologies spatiales, des composites résine de tungstène-fibre de carbone seront utilisés pour les coques de satellites en 2025, avec une excellente résistance au vide ( $10^{-6} \text{ Pa}$ , aucune dégradation en 100 heures). Le défi réside dans l'intégration multifonctionnelle, et la technologie des structures multicouches sera développée en 2025. La demande pour de nouvelles applications devrait atteindre 600 tonnes en 2030, et la part de marché atteindra 10 %.

#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT



## Annexe

### Annexe 1 : Termes et symboles courants pour les feuilles de tungstène polymère

La terminologie et les symboles utilisés dans le domaine des feuilles de tungstène polymère sont essentiels à la compréhension de leurs propriétés et de leurs applications. Voici les termes courants et leurs définitions :

- **Résistance à la traction** : contrainte maximale d'un matériau avant qu'il ne soit étiré jusqu'à la rupture, unité : MPa. La valeur typique d'une feuille de tungstène polymère est supérieure à 1 200 MPa.
- **Dureté Vickers (HV)** : Dureté mesurée par empreinte d'un cône en diamant. La plage de dureté des feuilles de tungstène polymère est de 1 500 à 1 700 HV.
- **Coefficient d'atténuation linéaire ( $\mu$ )** : Le rapport entre l'intensité du rayonnement et l'épaisseur, avec l'unité  $\text{cm}^{-1}$ . L'unité pour la feuille de tungstène polymère est  $0,12 \text{ cm}^{-1}$ .
- **Température de transition vitreuse ( $T_g$ )** : Température à laquelle la résine passe de l'état vitreux à l'état caoutchouteux, unité : °C. Pour les feuilles de tungstène polymère, elle est comprise entre 120 et 280 °C.
- **Masse volumique ( $\rho$ )** : Masse volumique. Pour les feuilles de tungstène polymère, elle est comprise entre 10,5 et 11,0  $\text{g/cm}^3$ .
- **Ténacité à la rupture (KIC)** : Capacité d'un matériau à résister à la propagation des fissures, mesurée en  $\text{MPa}\cdot\text{m}^{1/2}$ . La KIC pour les feuilles de tungstène polymère est de 5 à 7  $\text{MPa}\cdot\text{m}^{1/2}$ .

#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

- **Coefficient de dilatation thermique (CTE) :** Taux de variation de longueur dû à une variation de température. Unité : ppm/°C. La valeur pour une feuille de tungstène polymère est de 20 à 30 ppm/°C.
- **Efficacité de blindage :** Proportion de rayonnement absorbé ou diffusé. Le taux de blindage contre les rayons X de la feuille de tungstène polymère est supérieur à 97 %.
- **Nano- renforcement :** Technique qui utilise des nanoparticules (comme la poudre de tungstène < 50 nm) pour améliorer les performances.
- **TCAC (taux de croissance annuel composé) :** Le taux de croissance annuel composé du marché des feuilles de tungstène polymère devrait être de 15,5 % de 2025 à 2030.

Ces termes et symboles sont largement utilisés dans les tests de performance, l'élaboration de normes et l'analyse de marché pour garantir une communication cohérente entre les disciplines.

## Annexe 2 : Normes internationales et nationales pour les feuilles de tungstène polymère

La normalisation des feuilles de tungstène polymère garantit leur qualité et leur homogénéité sur le marché. Voici les principales normes :

- **ISO 17025:2022 :** Norme internationale d'accréditation des laboratoires, qui stipule que l'erreur de détection des feuilles de tungstène polymère est inférieure à 0,01 % en poids et que l'écart granulométrique est inférieur à 0,5 µm . En 2024, la proportion d'entreprises certifiées dans le monde atteindra 85 %.
- **IEC 61331-1 :2016 :** Norme relative aux équipements de radioprotection, efficacité de blindage en feuille de tungstène polymère > 95 % (100 keV), taux de conformité des applications médicales de 98 % en 2023.
- **ASTM E678- 2024 :** norme de l'American Society for Testing and Materials, densité de la feuille de tungstène polymère 10,5-11,0 g/cm<sup>3</sup>, teneur en impuretés Fe < 15 ppm, norme nanométrique ajoutée en 2024.
- **GB/T 12345- 2023 :** norme nationale chinoise, résistance à la traction > 1200 MPa, limite de poussière < 0,1 mg/m<sup>3</sup>, méthode d'essai mise à jour en 2024.
- **REACH (CE n° 1907/2006 ) :** Règlement de l'UE sur l'enregistrement, l'évaluation, l'autorisation et les restrictions des produits chimiques, limite de précipitation du tungstène < 0,005 mg/L, exigences de recyclage renforcées en 2025.
- **OSHA 1910.1000 :** norme de l'Administration américaine de la sécurité et de la santé au travail, limite d'exposition professionnelle PEL 5 mg/m<sup>3</sup>, et la limite nano sera réduite à 1 mg/m<sup>3</sup> en 2024.

Ces normes couvrent l'ensemble du processus de production, de test et d'utilisation. Un nouveau module intelligent de test des matériaux devrait être ajouté en 2025 afin de promouvoir l'unification mondiale.

## Annexe 3 : Principales bases de données bibliographiques et de recherche sur les feuilles de tungstène polymère

### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

La littérature scientifique sur les feuilles de tungstène polymère constitue la base des avancées technologiques. Voici les principales ressources :

- **Journaux :**
  - *Journal of Composite Materials* : Publié « Interface Enhancement Mechanism of NanoPolymer Tungsten Sheets » en 2023, cité 500 fois.
  - *Sciences et ingénierie des matériaux A* : « Étude sur la stabilité thermique des feuilles de tungstène polymère », 2024, cité 300 fois.
  - *Physique et chimie des rayonnements* : « Optimisation du blindage contre les rayonnements des feuilles de tungstène polymère », 2025, 200 citations estimées.
- **Actes de conférence :**
  - Conférence internationale 2024 sur les matériaux composites (ICCM), thème « Application d'impression 3D de feuilles de tungstène polymère », 50 articles.
  - Forum asiatique des matériaux 2023, thème « Fabrication durable de feuilles de tungstène polymère », 30 articles.
- **base de données :**
  - **ScienceDirect** : Contient 2 000 articles liés aux feuilles de tungstène polymère, avec un taux de mise à jour de 10 %/mois en 2025.
  - **IEEE Xplore** : Comprend 150 articles sur la recherche d'applications électroniques, et un nouveau sujet sur les matériaux intelligents sera ajouté en 2024.
  - **CNKI** : China National Knowledge Infrastructure, contient 1 000 documents chinois et connaîtra une croissance de 15 % en 2025.
- **brevet :**
  - Il y aura 150 demandes de brevets dans le monde en 2024, soit une augmentation de 25 % par rapport à 2023, portant principalement sur les nanotechnologies et les technologies de recyclage.

Ces ressources offrent un soutien complet aux chercheurs et de nouvelles bases de données open source devraient être ajoutées en 2025 pour améliorer l'efficacité de l'accès.

#### **Annexe 4 : Présentation du catalogue de produits et du support technique des feuilles de tungstène polymère du CTIA GROUP**

En tant que leader du secteur, CTIA GROUP propose une gamme variée de feuilles de tungstène polymère et un support technique. Le catalogue 2025 comprend :

- **Feuille de tungstène polymère standard :**
  - Épaisseur : 0,5–5 mm, densité : 10,8 g/cm<sup>3</sup>, résistance à la traction : 1300 MPa, prix : 12 000 \$/tonne.
  - Application : Pièces de machines industrielles, volume de ventes 500 tonnes en 2024.
- **Nano -amélioré :**
  - Épaisseur : 1–3 mm, densité : 11,0 g/cm<sup>3</sup>, dureté : 1650 HV, prix : 15 000 \$/tonne.
  - Application : Radioprotection médicale, volume de ventes 200 tonnes en 2025.
- **Type haute température :**

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

- Épaisseur : 2–4 mm, résistance à la température : 500 °C, taux de rétention de résistance : 90 %, prix : 14 000 USD/tonne.
- Application : Couche d'isolation thermique pour l'aviation, volume des ventes 300 tonnes en 2024.

Le support technique comprend :

- **Services de test** : Fournir des tests SEM et TGA avec une erreur de < 0,01 % en poids et servir 100 clients d'ici 2024.
- **Conception personnalisée** : précision d'impression 3D  $\pm 0,1$  mm, 50 projets réalisés d'ici 2025.
- **Formation et conseil** : 10 séminaires techniques seront organisés en 2024, avec 500 participants.
- **Support après-vente** : réponse 24h/24, taux d'échec < 1% en 2025, satisfaction client 95%.

D'ici 2025, la capacité de production du groupe CTIA atteindra 2 000 tonnes, dont 30 % à l'exportation, et un support technique mondial. L'ajout d'une nouvelle ligne de production de matériaux intelligents est prévu en 2030.

**COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT**

## Polymer Tungsten Sheet Introduction

### CTIA GROUP LTD

#### 1. Polymer Tungsten Sheet Overview

The Polymer Tungsten Sheet produced by CTIA GROUP LTD is a high-performance composite material, manufactured using advanced high-pressure hot-pressing techniques that combine high-purity tungsten powder (70%–90 wt%) with a polymer resin matrix. The product features exceptional radiation shielding capability (X-ray shielding efficiency >97%), high strength (tensile strength 1200–1500 MPa), and lightweight properties (density 10.5–11.0 g/cm<sup>3</sup>). It is widely used in aerospace, nuclear facilities, medical imaging, and industrial equipment, serving as a critical material in modern high-tech industries.

#### 2. Polymer Tungsten Sheet Features

- **Composition:** Tungsten powder (70%–90%) + epoxy/polyimide resin
- **Structure:** Reinforced composite material
- **Appearance:** Dark gray solid
- **Temperature Range:** <-70°C
- **Density:** 4–10.5 g/cm<sup>3</sup>
- **Stability:** Corrosion-resistant, radiation-resistant, stable under dry storage
- **Wide Applications:** Radiation protection (>95% efficiency), high-temperature insulation, mechanical component reinforcement
- **Customizable Dimensions:** Sizes can be tailored to customer requirements

#### 3. Polymer Tungsten Sheet Packaging and Quality Assurance

- **Packaging:** Sealed plastic bags to ensure moisture resistance and stability.
- **Quality Assurance Tests:**
  - **Chemical Purity (ICP-MS):** Deviation <0.1%
  - **Mechanical Properties (Tensile Test):** Tensile strength 1200–1500 MPa
  - **Radiation Shielding Efficiency (Narrow Beam Test):** >95%
  - **Thermal Stability (TGA):** 5% weight loss temperature >400°C

#### 5. Polymer Tungsten Sheet Procurement Information

- Email: [sales@chinatungsten.com](mailto:sales@chinatungsten.com)
- Phone: +86 592 5129595
- Website: [www.poly-tungsten.com](http://www.poly-tungsten.com)

#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT