

## Que sont les boîtiers de blindage en alliage de tungstène

中钨智造科技有限公司

CTIA GROUP LTD

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

### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

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

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

## PRÉSENTATION DU GROUPE CTIA

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

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

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

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



### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

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

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



## Table des matières

### Chapitre 1 : Découvrir le monde des boîtiers de blindage en alliage de tungstène

- 1.1 Concept des boîtiers de blindage en alliage de tungstène
  - 1.1.1 Définition des boîtiers de blindage en alliage de tungstène
  - 1.1.2 Éléments constitutifs de base des boîtiers de protection en alliage de tungstène
  - 1.1.3 Caractéristiques de base des boîtiers de protection en alliage de tungstène
- 1.2 Logique de sélection des matériaux pour les boîtiers de protection en alliage de tungstène
  - 1.2.1 Comparaison des performances entre les alliages de tungstène et les matériaux de blindage courants
  - 1.2.2 Principaux avantages des performances de blindage des boîtiers de blindage en alliage de tungstène
  - 1.2.3 Logique de sélection des boîtiers de blindage en alliage de tungstène en fonction de l'adaptation à la scène
- 1.3 Historique du développement et valeur industrielle des boîtiers de protection en alliage de tungstène
  - 1.3.1 Étapes de l'évolution technologique des boîtiers de protection en alliage de tungstène
  - 1.3.2 Percées technologiques majeures des alliages de tungstène dans les applications de blindage
  - 1.3.3 Réflexion sur la valeur de soutien du noyau des boîtiers de protection en alliage de tungstène dans les applications industrielles

### Chapitre 2 Mécanisme de blindage et indicateurs de performance des boîtiers de blindage en alliage de tungstène

- 2.1 Principes de base du blindage contre les radiations des boîtiers de blindage en alliage de tungstène
  - 2.1.1 Analyse des caractéristiques de propagation des rayonnements ionisants ciblés par les boîtiers de protection en alliage de tungstène
  - 2.1.2 Mécanisme de blindage (absorption et atténuation) des boîtiers de blindage en alliage de tungstène
    - 2.1.2.1 Corrélation entre la structure atomique du tungstène et les performances de blindage des boîtiers de blindage en alliage de tungstène
    - 2.1.2.2 Processus d'action des boîtiers de protection en alliage de tungstène sous différents rayonnements
    - 2.1.2.3 Effet d'optimisation de la composition de l'alliage sur le mécanisme de blindage des boîtiers de blindage en alliage de tungstène
  - 2.1.3 Analyse des facteurs affectant l'effet de blindage des boîtes de blindage en alliage de tungstène
    - 2.1.3.1 Caractéristiques intrinsèques des matériaux en alliage de tungstène
    - 2.1.3.2 Facteurs influençant les paramètres de conception des structures de blindage
    - 2.1.3.3 Caractéristiques de la source de rayonnement elle-même
    - 2.1.3.4 Facteurs influençant les conditions de l'environnement de service
    - 2.1.3.5 Facteurs de contrôle de précision du processus de fabrication
- 2.2 Système d'indicateurs clés de performance des boîtiers de protection en alliage de tungstène
  - 2.2.1 Indicateur de densité des boîtiers de blindage en alliage de tungstène
  - 2.2.2 Indicateur de dureté des boîtiers de protection en alliage de tungstène
  - 2.2.3 Indicateur de résistance à la traction des boîtiers de protection en alliage de tungstène
  - 2.2.4 Indicateur de performance d'étanchéité des boîtiers de protection en alliage de tungstène
  - 2.2.5 Indicateur de résistance à la corrosion des boîtiers de protection en alliage de tungstène
  - 2.2.6 Efficacité de blindage des boîtiers de blindage en alliage de tungstène
  - 2.2.7 Indicateur de ductilité des boîtiers de protection en alliage de tungstène

#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

2.2.8 Indicateur de résistance aux hautes températures des boîtiers de protection en alliage de tungstène

2.3 Fiche de données de sécurité des boîtes de protection en alliage de tungstène par CTIA GROUP LTD

### **Chapitre 3 Logique de conception et classification des types de boîtiers de blindage en alliage de tungstène**

3.1 Composition structurelle des boîtiers de protection en alliage de tungstène

3.1.1 Structure de blindage principale des boîtes de blindage en alliage de tungstène (corps de la boîte, couvercle de la boîte)

3.1.2 Structure fonctionnelle auxiliaire des boîtiers de protection en alliage de tungstène (doublure, pièces de connexion)

3.1.3 Principe de blindage par coordination structurelle des boîtiers de blindage en alliage de tungstène

3.2 Principaux types de boîtiers de protection en alliage de tungstène classés selon les scénarios de protection

3.2.1 Boîtiers de protection en alliage de tungstène spécialement conçus pour l'industrie nucléaire

3.2.2 Boîtiers de protection en alliage de tungstène spécialement conçus pour le domaine médical

3.2.3 Boîtiers de protection en alliage de tungstène spécialement conçus pour les essais industriels

3.3 Types courants de boîtiers de protection en alliage de tungstène classés selon leur structure

3.3.1 Boîtiers de blindage fixes en alliage de tungstène

3.3.2 Boîtiers de blindage portables en alliage de tungstène

3.3.3 Boîtiers de blindage étanches en alliage de tungstène

3.3.4 Boîtiers de blindage ouverts en alliage de tungstène

3.3.5 Boîtiers de blindage monocouches en alliage de tungstène

3.3.6 Boîtiers de blindage multicouches en alliage de tungstène

3.3.7 Boîtiers de blindage intégrés en alliage de tungstène

3.3.8 Boîtiers de blindage modulaires en alliage de tungstène

### **Chapitre 4 Procédé de fabrication des boîtiers de protection en alliage de tungstène**

4.1 Composition et exigences des matières premières pour les boîtiers de protection en alliage de tungstène

4.1.1 Proportion des principales matières premières des boîtiers de protection en alliage de tungstène

4.1.2 Exigences de pureté et de granulométrie des matières premières pour les boîtes de protection en alliage de tungstène

4.1.3 Normes de sélection et exigences relatives aux matériaux auxiliaires pour les boîtiers de protection en alliage de tungstène

4.2 Procédé de fabrication des boîtiers de protection en alliage de tungstène

4.2.1 Procédé de métallurgie des poudres de base pour les boîtes de protection en alliage de tungstène (Préparation de la poudre, Mélange, Pressage)

4.2.2 Processus de frittage clé et contrôle des paramètres des boîtes de protection en alliage de tungstène

4.2.3 Procédé d'usinage des boîtiers de protection en alliage de tungstène

4.2.4 Procédé de traitement de surface des boîtiers de protection en alliage de tungstène

4.3 Points de contrôle qualité dans le processus de fabrication des boîtes de protection en alliage de tungstène

4.3.1 Normes et méthodes d'inspection à réception des matières premières des boîtes de protection en alliage de tungstène

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

4.3.2 Points de contrôle qualité dans les processus intermédiaires de fabrication des boîtiers de protection en alliage de tungstène

4.3.3 Processus d'inspection complète des boîtes de protection en alliage de tungstène finies avant livraison

## Chapitre 5 Domaines d'application des boîtiers de protection en alliage de tungstène

5.1 Application des boîtiers de protection en alliage de tungstène dans l'industrie nucléaire

5.1.1 Boîtiers de protection en alliage de tungstène pour le stockage et le transport du combustible usé

5.1.2 Boîtiers de protection en alliage de tungstène pour le traitement des déchets radioactifs

5.1.3 Boîtiers de protection en alliage de tungstène pour échantillons d'exploration géologique nucléaire

5.1.4 Boîtiers de protection en alliage de tungstène pour équipements auxiliaires de réacteurs nucléaires

5.2 Application des boîtiers de protection en alliage de tungstène dans le domaine médical et de la santé

5.2.1 Boîtes de protection en alliage de tungstène pour le stockage et le transport de médicaments radioactifs

5.2.2 Boîtiers de protection en alliage de tungstène pour sources de radiothérapie

5.2.3 Boîtiers de protection en alliage de tungstène pour équipements d'imagerie médicale

5.2.4 Boîtes de protection en alliage de tungstène pour le stockage temporaire de déchets radioactifs

5.2.5 Boîtiers de protection en alliage de tungstène pour la protection des réactifs de diagnostic in vitro

5.3 Application des boîtiers de protection en alliage de tungstène dans les essais industriels et le domaine électronique

5.3.1 Boîtiers de protection en alliage de tungstène pour sources d'inspection radiographique industrielle

5.3.2 Boîtiers de blindage en alliage de tungstène pour composants électroniques contre les interférences

5.3.3 Boîtiers de blindage en alliage de tungstène pour les tests de fabrication de semi-conducteurs

5.3.4 Boîtiers de protection en alliage de tungstène pour équipements de contrôle non destructif

5.3.5 Boîtiers de blindage en alliage de tungstène pour la protection des instruments électroniques de précision

5.4 Application des boîtiers de protection en alliage de tungstène dans le domaine aérospatial

5.4.1 Boîtiers de protection en alliage de tungstène pour les essais de rayonnement aérospatial

5.4.2 Boîtiers de protection en alliage de tungstène pour la protection des composants aérospatiaux

5.4.3 Boîtiers de protection en alliage de tungstène pour les essais de matériaux aérospatiaux

5.5 Application des enceintes de protection en alliage de tungstène sur le terrain d'expérimentation en recherche scientifique

5.5.1 Boîtiers de protection en alliage de tungstène pour échantillons d'expériences de physique nucléaire

5.5.2 Boîtiers de protection en alliage de tungstène pour les expériences de physique des particules

5.5.3 Boîtiers de protection en alliage de tungstène pour la surveillance des rayonnements environnementaux

5.6 Application des boîtiers de protection en alliage de tungstène dans d'autres domaines spécifiques

5.6.1 Boîtiers de blindage en alliage de tungstène sur mesure pour environnements spéciaux

5.6.2 Boîtiers de blindage en alliage de tungstène spécialement conçus pour l'industrie de la défense nationale et militaire

5.6.3 Boîtiers de protection en alliage de tungstène pour l'exploration géologique et l'exploitation minière

5.6.4 Boîtiers de protection en alliage de tungstène pour les essais de rayonnement aérospatial

5.6.5 Boîtiers de protection en alliage de tungstène pour échantillons d'expériences de physique nucléaire

### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

5.6.6 Application de boîtiers de protection en alliage de tungstène sur mesure pour environnements spéciaux

## Chapitre 6 : Sélection, utilisation et entretien des boîtiers de protection en alliage de tungstène

6.1 Méthode de sélection scientifique des boîtiers de protection en alliage de tungstène

6.1.1 Critères de sélection des boîtiers de protection en alliage de tungstène en fonction des caractéristiques de rayonnement

6.1.2 Points de sélection des boîtiers de protection en alliage de tungstène en fonction des scénarios de service

6.1.3 Vérification de la sélection des boîtiers de protection en alliage de tungstène selon les normes industrielles

6.2 Spécifications de sécurité d'utilisation des boîtiers de protection en alliage de tungstène

6.2.1 Procédures de fonctionnement de base et spécifications des boîtiers de protection en alliage de tungstène

6.2.2 Exigences de sécurité pour le déplacement et le transport des boîtes de protection en alliage de tungstène

6.2.3 Élimination d'urgence et gestion des défauts des boîtiers de protection en alliage de tungstène

6.3 Techniques d'entretien quotidien et de prolongation de la durée de vie des boîtiers de protection en alliage de tungstène

6.3.1 Méthodes de nettoyage et d'entretien courants des boîtiers de protection en alliage de tungstène

6.3.2 Inspection régulière et étalonnage des performances des boîtiers de protection en alliage de tungstène

6.3.3 Remplacement et entretien des pièces vulnérables des boîtiers de protection en alliage de tungstène

## Chapitre 7 Comparaison entre les boîtes de protection en alliage de tungstène et les autres boîtes de protection

7.1 Comparaison entre les boîtes de protection en alliage de tungstène et les boîtes de protection en alliage de plomb

7.1.1 Comparaison des performances entre les boîtes de blindage en alliage de tungstène et les boîtes de blindage en alliage de plomb (efficacité de blindage, densité, etc.)

7.1.2 Comparaison de l'impact environnemental des boîtes de protection en alliage de tungstène et des boîtes de protection en alliage de plomb

7.1.3 Comparaison des scénarios d'application entre les boîtes de protection en alliage de tungstène et les boîtes de protection en alliage de plomb

7.1.4 Comparaison du coût du cycle de vie complet entre les boîtes de protection en alliage de tungstène et les boîtes de protection en alliage de plomb

7.2 Comparaison entre les boîtes de protection en alliage de tungstène et les boîtes de protection en acier

7.2.1 Comparaison des performances de blindage entre les boîtes de blindage en alliage de tungstène et les boîtes de blindage en acier

7.2.2 Comparaison des performances mécaniques entre les boîtes de protection en alliage de tungstène et les boîtes de protection en acier

7.2.3 Comparaison de l'adaptabilité environnementale entre les boîtes de protection en alliage de tungstène et les boîtes de protection en acier

### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT



7.2.4 Comparaison du rapport coût-efficacité entre les boîtes de protection en alliage de tungstène et les boîtes de protection en acier

7.3 Comparaison entre les boîtes de blindage en alliage de tungstène et les boîtes de blindage en matériau composite

7.3.1 Comparaison de la composition des matériaux entre les boîtes de blindage en alliage de tungstène et les boîtes de blindage en matériau composite

7.3.2 Comparaison du mécanisme de blindage entre les boîtiers de blindage en alliage de tungstène et les boîtiers de blindage en matériau composite

7.3.3 Comparaison de la stabilité entre les boîtes de protection en alliage de tungstène et les boîtes en matériau composite

7.3.4 Comparaison des perspectives d'application entre les boîtes de blindage en alliage de tungstène et les boîtes de blindage en matériau composite

#### Annexes :

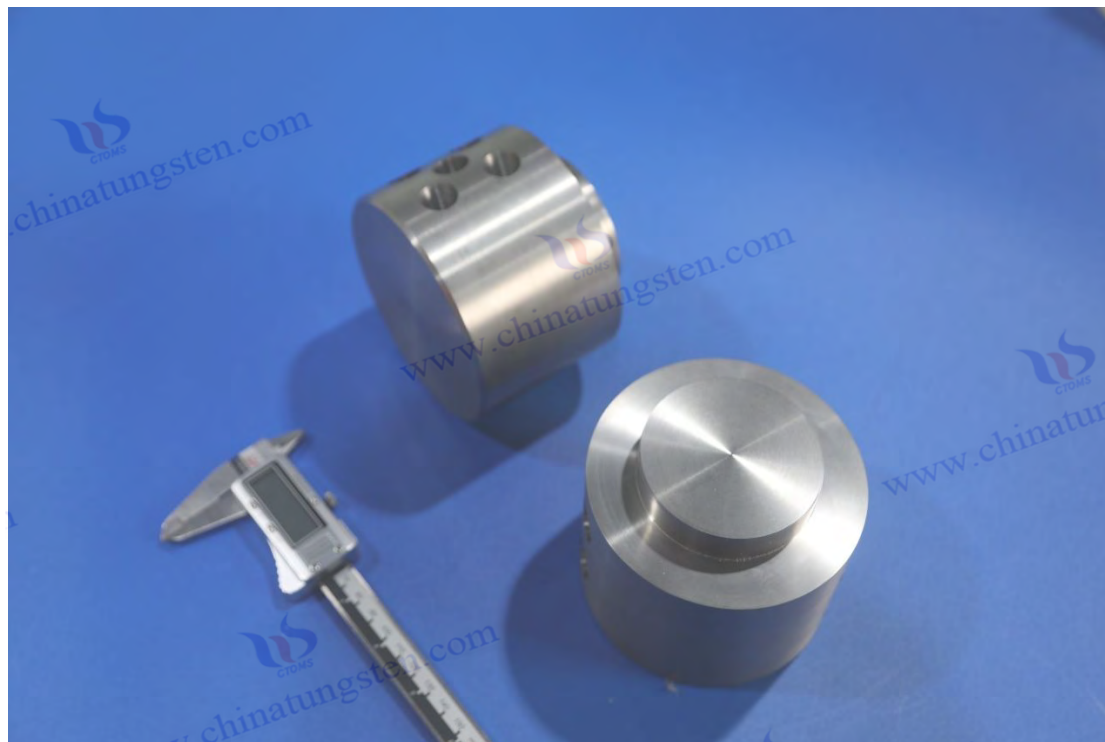
Annexe A Normes chinoises pour les boîtiers de blindage en alliage de tungstène

Annexe B Normes internationales pour les boîtiers de protection en alliage de tungstène

Annexe C Normes relatives aux boîtes de protection en alliage de tungstène en Europe, en Amérique, au Japon, en Corée du Sud et dans d'autres pays

Annexe D Glossaire des termes relatifs aux boîtiers de blindage en alliage de tungstène

Références



CTIA GROUP LTD Boîtier de blindage en alliage de tungstène

#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

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

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

## CTIA GROUP LTD

### High-Density Tungsten Alloy Customization Service

CTIA GROUP LTD, a customization expert in high-density tungsten alloy design and production with 30 years of experience.

**Core advantages:** 30 years of experience: deeply familiar with tungsten alloy production, mature technology.

**Precision customization:** support high density (17-19 g/cm<sup>3</sup>), special performance, complex structure, super large and very small parts design and production.

**Quality cost:** optimized design, optimal mold and processing mode, excellent cost performance.

**Advanced capabilities:** advanced production equipment, RMI, ISO 9001 certification.

#### 100,000+ customers

Widely involved, covering aerospace, military industry, medical equipment, energy industry, sports and entertainment and other fields.

#### Service commitment

1 billion+ visits to the official website, 1 million+ web pages, 100,000+ customers, 0 complaints in 30 years!

Contact us

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

Tel: +86 592 5129696

Official website: [www.tungsten-alloy.com](http://www.tungsten-alloy.com)



#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

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

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

## Chapitre 1 : Découvrir le monde des boîtiers de blindage en alliage de tungstène

### 1.1 Concept de blindage en alliage de tungstène

Les conteneurs de blindage en alliage de tungstène sont des conteneurs fonctionnels conçus et fabriqués spécifiquement pour le confinement et le blindage des matières radioactives. Ils utilisent des alliages de tungstène haute densité comme matériau principal dans les techniques modernes de radioprotection. Ils tirent pleinement parti de la densité apparente nettement supérieure des alliages de tungstène par rapport au plomb, au fer ou au béton, ainsi que de leurs excellentes propriétés d'atténuation des rayons gamma, des rayons X et des flux de neutrons, assurant ainsi un blindage radiologique très efficace dans un espace réduit. Parallèlement, ils présentent une résistance structurelle suffisante, une stabilité thermique, une inertie chimique et une fiabilité de confinement à long terme optimales. Comparés aux méthodes de blindage traditionnelles, les conteneurs de blindage en alliage de tungstène lèvent le paradoxe inhérent « meilleure protection, volume plus important, poids plus élevé », réduisant considérablement le volume et la masse totaux pour un même niveau de protection. Il en résulte une amélioration de l'utilisation de l'espace, de la flexibilité opérationnelle et de l'accessibilité pour le personnel.

En pratique, les conteneurs de blindage en alliage de tungstène constituent à la fois la première barrière de confinement physique pour les sources radioactives ou les déchets radioactifs et une barrière d'ingénierie essentielle pour le contrôle de la dose de rayonnement. Ils sont largement utilisés autour des équipements d'imagerie de médecine nucléaire, des chambres chaudes de production d'isotopes, des chambres noires d'inspection radiologique industrielle, des canaux d'irradiation des réacteurs de recherche, des terminaux expérimentaux de physique des hautes énergies, ainsi que pour le stockage et le transfert temporaires des déchets radioactifs. Ils deviennent ainsi un élément physique clé pour atteindre les principes de « protection optimale » et de « dose minimale ». Avec l'évolution des applications radiologiques vers une activité plus élevée, une compacité accrue et une mobilité renforcée, les conteneurs de blindage en alliage de tungstène ont progressivement remplacé les conteneurs traditionnels en plomb, en verre au plomb et en béton lourd. Ils sont aujourd'hui reconnus comme la référence en matière de solutions de blindage performantes, écologiques et durables dans le domaine de la radioprotection.

#### 1.1.1 Définition d'un boîtier blindé en alliage de tungstène

Un conteneur de blindage en alliage de tungstène est défini comme un conteneur composite fabriqué à partir d'alliages haute densité de tungstène-nickel-fer, de tungstène-nickel-cuivre ou de tungstène-nickel-fer-cuivre, contenant au moins 90 % de tungstène. Ce conteneur est fabriqué par frittage, forgeage ou usinage de précision, et assure à la fois le confinement de matières radioactives et la protection contre les rayonnements. Sa conception doit satisfaire simultanément aux exigences mécaniques et thermiques de l'Agence internationale de l'énergie atomique (AIEA) relatives aux conteneurs de transport de matières radioactives, aux conditions d'homologation des autorités nationales de sûreté nucléaire pour les conteneurs de stockage et de manutention, ainsi qu'aux limites de débit de dose surfacique les plus strictes en matière de radioprotection médicale et industrielle.

#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT



Du point de vue des sciences des matériaux, il s'agit d'une application typique d'alliages haute densité intégrés, alliant structure et fonction, en radioprotection ; du point de vue de l'ingénierie des systèmes, c'est un élément central d'un système de blindage complet ; et du point de vue réglementaire et normatif, c'est une application concrète des conteneurs de transport de matières radioactives de type A, B ou C, des conteneurs pour sources industrielles, des conteneurs pour sources médicales ou des conteneurs à déchets. C'est précisément ce haut degré d'intégration de multiples attributs qui rend les conteneurs de blindage en alliage de tungstène irremplaçables dans les systèmes modernes de radioprotection.

### 1.1.2 Composants de base des boîtiers blindés en alliage de tungstène

Un réservoir de protection typique en alliage de tungstène se compose d'un corps, d'un couvercle supérieur ou d'un couvercle d'extrémité, d'un système d'étanchéité et de verrouillage, d'une interface de levage et de manutention, d'un revêtement fonctionnel de surface, d'un revêtement de nettoyage de la cavité interne et de diverses interfaces fonctionnelles auxiliaires. Le corps est généralement fabriqué à partir d'une seule pièce frittée ou d'anneaux forgés multi-segments soudés afin de garantir une épaisseur de couche de protection continue et l'absence de joints. Le couvercle supérieur adopte le plus souvent une structure encastrée ou convexe et bénéficie d'un ajustement au micron près grâce à un meulage de précision. Le système d'étanchéité repose généralement sur une conception à double sécurité, avec un joint labyrinthe à plusieurs étages et des bagues d'étanchéité élastiques résistantes aux radiations ou des bagues d'étanchéité métalliques ondulées. Cette conception empêche les fuites d'aérosols radioactifs tout en garantissant la possibilité de détachement après irradiation à haute température. Les mécanismes de verrouillage utilisent principalement des brides à verrouillage rapide, des joints multi-filetés ou des bagues de verrouillage hydrauliques, assurant un équilibre entre rapidité d'exécution et résistance au desserrage à long terme. Les interfaces de levage et de manutention comprennent des anneaux de levage forgés intégrés sur le dessus, des fentes pour chariot élévateur sur les côtés ou des palettes standardisées sur le dessous, répondant ainsi aux exigences opérationnelles des véhicules de transport blindés, des portiques ou des bras robotisés.

La surface est souvent revêtue d'un nickelage chimique, d'une oxydation à l'oxyde noir ou d'un revêtement de décontamination spécial afin d'améliorer la résistance à la corrosion et l'efficacité de la décontamination. Le produit intègre également une fenêtre d'observation en verre au plomb, une interface pour sonde de surveillance du débit de dose, une vanne d'équilibrage de pression, un mécanisme de commande de la source intégré ou une doublure remplaçable, transformant ainsi un simple conteneur en un système blindé intégré aux fonctions multiples, notamment la surveillance, le fonctionnement et le transport. Ces éléments ont été conçus dès le départ selon les principes du système : confinement, blindage, opérabilité et capacité de décontamination, aboutissant à une structure globale hautement coordonnée et redondante en matière de sécurité.

### 1.1.3 Caractéristiques fondamentales des conteneurs de blindage en alliage de tungstène

Les principaux atouts des conteneurs de blindage en alliage de tungstène résident dans leur haute efficacité de blindage, ainsi que dans leurs dimensions et leur poids réduits. À énergie de rayonnement et exigences de protection égales, leur épaisseur est bien inférieure à celle des conteneurs en plomb, tout

#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

en offrant une atténuation de dose équivalente, voire supérieure. Ceci permet de gagner un espace précieux dans l'enceinte thermique et de réduire la charge du bâtiment. Par ailleurs, ils présentent d'excellentes propriétés mécaniques et une grande stabilité thermique. L'irradiation prolongée et les cycles thermiques ne provoquent ni ramollissement du plomb, ni microfissures, ni fuites dans le béton, garantissant ainsi la fiabilité et l'étanchéité de la structure.

Troisièmement, il présente une excellente résistance à la corrosion et se nettoie facilement. Le système tungstène-nickel-cuivre est stable en milieux humides, acides, alcalins ou salins. Associé à une cavité intérieure polie miroir, il simplifie et optimise les opérations de nettoyage répétées, réduisant ainsi considérablement le volume des déchets secondaires. Quatrièmement, il est totalement non toxique et sans plomb, éliminant ainsi les risques environnementaux et sanitaires liés aux conteneurs en plomb traditionnels et répondant aux exigences les plus strictes en matière de stockage final des déchets radioactifs et de radioprotection. Enfin, il offre une grande liberté de conception et une précision de fabrication exceptionnelle. L'épaisseur des parois, la forme de la cavité et le type d'interface peuvent être personnalisés en fonction du spectre énergétique, de l'activité, de la forme chimique et de l'application de la source radioactive, permettant une couverture complète, des conteneurs miniatures pour sources médicales aux grands conteneurs de transfert de déchets.

Grâce à ces avantages interdépendants et exceptionnels, les conteneurs de blindage en alliage de tungstène ont non seulement considérablement amélioré l'économie et la facilité d'utilisation de la radioprotection, mais ont également favorisé l'évolution profonde de la médecine nucléaire, de la production d'isotopes, de la détection des défauts industriels et des installations d'irradiation scientifique vers la miniaturisation, la modularisation et l'écologisation, devenant ainsi l'un des composants de blindage les plus avancés technologiquement et les plus représentatifs de l'ingénierie contemporaine de la sécurité radiologique.

## 1.2 Logique de sélection des matériaux pour les boîtiers de blindage en alliage de tungstène

candidats, les alliages de tungstène se sont distingués et sont devenus le matériau de structure privilégié pour les réservoirs de blindage haut de gamme. Leur succès repose sur un équilibre optimal entre de multiples dimensions, notamment l'atténuation des rayonnements, les propriétés mécaniques, la stabilité thermique, l'inertie chimique, la facilité de mise en œuvre et la compatibilité environnementale. Les conceptions de blindage traditionnelles ont longtemps reposé sur le plomb, le béton, le polyéthylène boré ou l'acier ordinaire, mais chacun de ces matériaux présente des inconvénients majeurs : le plomb, bien que dense, est toxique et sujet à un fluage important à haute température ; le béton offre une faible efficacité de blindage et est inamovible ; le polyéthylène boré n'est efficace que contre les neutrons et quasiment inefficace contre les rayons gamma ; et l'acier ordinaire ne répond que difficilement aux exigences, moyennant des parois extrêmement épaisses. Le choix des matériaux repose fondamentalement sur l'objectif d'obtenir une atténuation maximale des rayonnements, une durée de vie optimale, des coûts de maintenance réduits et une compatibilité environnementale maximale, le tout dans des contraintes d'espace et de poids limitées. Les alliages de tungstène, grâce à leur microstructure de densité quasi théorique, leur coefficient d'atténuation des rayons gamma élevé, leur capacité de modulation neutronique modérée et leurs excellentes propriétés mécaniques, répondent parfaitement à

### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

cet objectif. Dans les environnements où l'espace est extrêmement sensible et les exigences de décontamination strictes, comme les chambres chaudes de médecine nucléaire, les lignes de production d'isotopes, les chambres anéchoïques de contrôle industriel et les terminaux expérimentaux de physique des hautes énergies, les conteneurs de blindage en alliage de tungstène constituent la seule solution réaliste permettant de concilier les contraintes réglementaires, techniques et économiques.

### 1.2.1 Comparaison des performances des alliages de tungstène et des matériaux de blindage courants

Comparativement au plomb, les alliages de tungstène offrent des capacités de protection contre les rayons gamma équivalentes, voire supérieures, tout en éliminant totalement la forte toxicité, le ramollissement par fluage et les risques de contamination secondaire associés au plomb. Les conteneurs en plomb sont très sensibles à la déformation irréversible après une irradiation prolongée et à des températures élevées, ce qui entraîne une défaillance de l'étanchéité et une augmentation du débit de dose en surface. À l'inverse, les conteneurs en alliage de tungstène conservent leur précision géométrique et leur résistance structurelle, même sous irradiation à haute température, évitant ainsi ces risques. De plus, la nature non toxique des alliages de tungstène en fait un matériau de choix pour les autorités réglementaires dans les secteurs médical et de la production d'isotopes ; après décontamination, ils peuvent être éliminés directement avec les déchets métalliques ordinaires, tandis que les conteneurs en plomb nécessitent souvent des procédures d'élimination spécifiques respectueuses de l'environnement.

Comparativement à l'acier ordinaire et à l'acier inoxydable, les alliages de tungstène présentent une densité apparente bien supérieure, permettant ainsi de réduire considérablement l'épaisseur des parois tout en obtenant le même niveau de protection. Il en résulte une répartition du poids global plus équilibrée, ce qui les rend particulièrement adaptés aux applications nécessitant des levages fréquents ou lorsque l'espace d'installation est limité. Si l'acier inoxydable offre une excellente résistance à la corrosion, son épaisseur est plusieurs fois supérieure à celle des alliages de tungstène pour atteindre la même atténuation sous rayonnement gamma de haute énergie, ce qui engendre un poids excessif du conteneur et une charge importante dans la chambre chaude. Les alliages de tungstène, quant à eux, permettent d'atteindre le débit de dose requis avec une paroi plus mince, réduisant ainsi les coûts de génie civil et les besoins en matériel de levage.

Comparativement aux céramiques techniques et aux matériaux ultra-durs et fragiles comme le saphir, les alliages de tungstène conservent une dureté extrêmement élevée tout en possédant une ténacité métallique, évitant ainsi la fissuration catastrophique observée dans les matériaux céramiques sous l'effet d'un impact ou d'un choc thermique. Si les composants de blindage en céramique offrent une efficacité d'atténuation élevée pour certaines énergies de rayonnement, leur fabrication est complexe, coûteuse et ils ne sont pas réparables ; la moindre microfissure les rend inutilisables. À l'inverse, les conteneurs de blindage en alliage de tungstène permettent une réparation par refusion laser après un dommage localisé, ce qui améliore considérablement la rentabilité globale du cycle de vie.

Comparativement au polyéthylène contenant du bore et à d'autres matériaux de protection contre les neutrons, les alliages de tungstène, bien que moins efficaces pour modérer les neutrons thermiques que

#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

les matériaux contenant de l'hydrogène, offrent une protection combinée nettement supérieure contre les rayons gamma et les neutrons rapides. Plus important encore, les alliages de tungstène permettent une protection combinée contre les rayons gamma et les neutrons au sein d'un même conteneur grâce à l'intégration locale de couches contenant du bore ou de l'hydrogène, tandis que les matériaux plastiques sont sujets au vieillissement et à la déformation à haute température, ce qui les rend inadaptés aux applications structurelles.

Comparés aux matériaux de blindage à base d'uranium appauvri, les alliages de tungstène évitent complètement les problèmes de radioactivité et les restrictions réglementaires, tout en ayant des propriétés mécaniques et une usinabilité supérieures, ce qui leur permet d'être utilisés sans entrave en médecine nucléaire civile, dans la détection des défauts industriels et dans les installations de recherche scientifique.

### 1.2.2 Principaux avantages des boîtiers de protection en alliage de tungstène en matière de performance de blindage

L'efficacité des conteneurs de blindage en alliage de tungstène repose principalement sur leur capacité d'atténuation volumique extrêmement élevée des rayons gamma et X. Grâce au numéro atomique élevé et à la forte densité électronique du tungstène, la section efficace combinée de l'effet photoélectrique, de la diffusion Compton et de l'effet de paires d'électrons dépasse largement celle des métaux conventionnels comme le plomb et le fer. Ceci permet à une même masse de couche de blindage de bloquer davantage de photons de haute énergie, ce qui se traduit par une réduction significative de l'épaisseur des parois à débit de dose égal, une forme de conteneur plus compacte et une augmentation substantielle du volume interne utile. Dans les espaces restreints tels que les cellules chaudes de médecine nucléaire, les salles de distribution d'isotopes et les salles TEP-TDM, cela signifie qu'il est possible d'installer davantage d'équipements fonctionnels ou de réduire considérablement l'épaisseur des parois de blindage, ce qui représente un gain économique considérable.

Deuxièmement, les alliages de tungstène présentent d'excellentes capacités de ralentissement et d'absorption des neutrons rapides. En particulier, dans le système tungstène-nickel-fer, la section efficace de diffusion inélastique élevée du fer et la diffusion élastique à haute densité du tungstène agissent en synergie pour réduire efficacement l'énergie des neutrons. Associé à une couche à libération lente externe ou interne contenant de l'hydrogène ou du bore, un blindage composite gamma-neutron peut être obtenu sans nécessiter de couches supplémentaires de matériaux hétérogènes, contrairement aux conteneurs en plomb. Cette capacité à réaliser un blindage à large spectre avec un seul matériau simplifie considérablement la conception structurelle du conteneur et élimine le risque de défaillance de l'interface intercouche.

Plus important encore, les performances de blindage des alliages de tungstène diminuent très peu avec l'augmentation de la température et, même sous irradiation à haute température, ils conservent leur microstructure et leur macro-géométrie intactes. À l'inverse, le plomb subit un fluage important à haute température, le béton développe des microfissures dues à la perte d'eau et le polyéthylène boré se ramollit et vieillit. Le faible coefficient de dilatation thermique et la température de recristallisation élevée des

#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT



alliages de tungstène permettent au conteneur de blindage de conserver son épaisseur nominale, même en cas d'incendie ou d'irradiation prolongée à haute température, garantissant ainsi que le débit de dose ne dépasse pas la limite autorisée et permettant de gagner un temps précieux pour l'intervention d'urgence.

Enfin, les surfaces en alliage de tungstène peuvent former un film d'oxyde dense et stable par polissage, placage ou passivation chimique, présentant une adsorption extrêmement faible des radionucléides secondaires, un coefficient de décontamination élevé et la capacité de retrouver des niveaux de radioactivité normaux même après des contaminations répétées. À l'inverse, les surfaces en plomb sont poreuses et sujettes à une contamination irréversible, tandis que le béton, de par sa rugosité et sa porosité, devient un support durable pour les poussières radioactives. Compte tenu de ces caractéristiques, les conteneurs de blindage en alliage de tungstène offrent des performances exceptionnelles en matière d'efficacité de blindage, d'adaptabilité spectrale, de robustesse environnementale et de capacité de décontamination à long terme, ce qui en fait le matériau de blindage de choix pour les installations de radioprotection modernes de pointe.

### 1.2.3 Logique de sélection des boîtiers de protection en alliage de tungstène en fonction du scénario

En ingénierie pratique, le choix des conteneurs de blindage en alliage de tungstène suit une logique systématique intégrant la source, le contexte d'utilisation, la réglementation, la durée de vie et le coût. Tout d'abord, l'épaisseur de blindage requise et le matériau sont déterminés en fonction du type, du spectre énergétique et de l'activité de la source radioactive : le système tungstène-nickel-fer est privilégié pour les sources gamma de haute énergie afin d'assurer également le blindage contre les neutrons ; le système non magnétique tungstène-nickel-cuivre est choisi pour les sources gamma pures dans les environnements médicaux sensibles aux champs magnétiques ; en cas de traitement de déchets radioactifs liquides fluorés ou fortement acides, une couche de revêtement interne résistante à la corrosion doit être ajoutée ou un alliage tungstène-nickel-cuivre présentant une meilleure résistance à la corrosion par piqûres doit être sélectionné.

Deuxièmement, la répartition de l'épaisseur des parois et la forme structurelle sont déterminées en fonction des contraintes d'espace et de poids du scénario d'utilisation : les grands réservoirs fixes à chambre chaude privilégient une épaisseur de paroi uniforme et une rigidité globale, et adoptent une structure à frittage intégral ou à manchon multicouche ; les conteneurs de transport mobiles privilégient un poids optimal et une résistance aux chutes, et adoptent souvent une conception à gradient d'épaisseur extérieure mince et intérieure épaisse, complétée par une base absorbant les chocs ; les petits réservoirs de source intégrés à une boîte à gants accordent une plus grande importance à la facilité d'utilisation, et utilisent des couvercles à ouverture rapide et des anneaux de levage légers.

De plus, le strict respect des exigences réglementaires est essentiel : les réservoirs de transfert de déchets médicaux doivent être conformes à la double certification de l'Administration nationale des produits médicaux et de l'Administration nationale de la sûreté nucléaire, et le débit de dose en surface, le facteur de décontamination et la biocompatibilité doivent tous réussir les tests de type ; les réservoirs de transfert de déchets industriels doivent répondre aux normes des conteneurs de transport de type A ou de type B, et les tests de chute, d'empilage et d'incendie sont indispensables ; et les réservoirs utilisés pour les

#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

expériences de recherche scientifique mettent davantage l'accent sur la diversité des interfaces et la capacité d'être rapidement modifiés.

Enfin, en considérant le coût total du cycle de vie et la stratégie de maintenance : bien que le coût d'achat initial d'un alliage de tungstène soit supérieur à celui du plomb, son absence de maintenance, l'absence de contamination au plomb, sa réparabilité et sa durée de vie extrêmement longue permettent d'obtenir un coût total de possession bien inférieur à celui des matériaux traditionnels. En particulier dans les lignes de production de médecine nucléaire et d'isotopes nécessitant des ouvertures, des distributions et des décontaminations fréquentes, les conteneurs de blindage en alliage de tungstène permettent souvent d'amortir l'investissement en trois ans grâce aux économies de main-d'œuvre, à la réduction du volume de déchets et à l'élimination des pertes dues aux arrêts de production.

En raison de la boucle fermée étroite de la logique ci-dessus, la sélection des réservoirs de protection en alliage de tungstène a évolué de la « priorité à la performance » initiale à la pratique d'ingénierie système actuelle « axée sur les scénarios, guidée par la réglementation et économique sur le cycle de vie », garantissant que chaque réservoir de protection quittant l'usine constitue non seulement une barrière solide contre les rayonnements, mais aussi le support optimal pour l'efficacité d'exploitation des installations et la conformité environnementale.

### 1.3 Historique du développement et valeur industrielle des boîtiers de protection en alliage de tungstène

Les conteneurs de blindage en alliage de tungstène résultent de la convergence de trois facteurs : les progrès de la science des matériaux en alliage haute densité, les exigences de l'ingénierie de la radioprotection et l'essor rapide des industries de la médecine nucléaire et des isotopes. D'abord considérés comme une alternative haut de gamme aux conteneurs en plomb, puis comme un composant standard des chambres chaudes de médecine nucléaire et des lignes de production d'isotopes, et enfin intégrés progressivement à l'ensemble de la chaîne de contrôle des défauts industriels, des installations d'irradiation scientifique et de la gestion des déchets radioactifs, les conteneurs de blindage en alliage de tungstène ont connu une transformation remarquable, passant d'une option à un élément essentiel. Cette transformation s'explique par les avancées constantes réalisées dans la métallurgie et les techniques de traitement des alliages de tungstène, les exigences des réglementations internationales en matière de radioprotection (matériaux sans plomb, à longue durée de vie et résistants à la décontamination), et la nécessité impérieuse de réduire le coût des ressources spatiales et de limiter les doses d'irradiation pour le personnel. Leur valeur industrielle réside non seulement dans l'amélioration significative du niveau de sécurité et de l'efficacité opérationnelle des installations, mais aussi dans leur contribution à la modernisation structurelle de l'ensemble du secteur des applications de la radioprotection, vers plus de compacité, de respect de l'environnement et d'intelligence.

#### 1.3.1 Étapes de l'évolution technologique des boîtiers de protection en alliage de tungstène

La première phase (avant les années 1990) a consisté en une phase de validation de principe et d'expérimentation à petite échelle. À cette époque, les alliages de tungstène étaient principalement

#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

utilisés sous forme de simples blocs ou plaques pour les collimateurs de rayonnement localisé, et les conteneurs de protection étaient encore majoritairement fabriqués en plomb coulé ou en maçonnerie de briques de plomb. Quelques instituts de recherche et centres médicaux de pointe ont tenté d'usiner des alliages de tungstène pour en faire de petits conteneurs de sources médicales ou des manchons de protection pour seringues, mais en raison du manque de maturité des techniques de mise en forme quasi-définitive des alliages de tungstène, des coûts élevés et du manque de données sur les performances après irradiation, le champ d'application est resté extrêmement restreint, se limitant à la personnalisation en laboratoire.

La seconde phase (fin des années 1990 – début du XXI<sup>e</sup> siècle) a été marquée par une avancée majeure. L'industrialisation du frittage sous vide et du pressage isostatique à chaud a permis d'accroître considérablement la taille et la densité des ébauches en alliage de tungstène, rendant possible la mise en forme quasi-finale de conteneurs complexes et de formes irrégulières en une seule opération. Parallèlement, la popularisation rapide de la TEP-TDM et des cyclotrons en médecine nucléaire a mis en évidence les problèmes de contraintes d'espace dans les chambres chaudes et de contamination au plomb, entraînant l'élargissement du champ d'application des conteneurs de blindage en alliage de tungstène : des petits conteneurs médicaux aux conteneurs de transport de taille moyenne et aux conteneurs de fixation pour chambres chaudes. La maturité du système non magnétique tungstène-nickel-cuivre a levé les obstacles à son application dans les environnements compatibles avec l'IRM, faisant des conteneurs de blindage en alliage de tungstène un matériau alternatif haut de gamme sur le marché durant cette période.

La troisième étape (la première décennie du XXI<sup>e</sup> siècle) a été marquée par la normalisation et la production à grande échelle. L'Agence internationale de l'énergie atomique et les organismes de sûreté nucléaire de divers pays ont successivement intégré l'absence de plomb dans leurs recommandations relatives au transport et au stockage des matières radioactives. Les conteneurs blindés en alliage de tungstène ont ainsi été officiellement inclus pour la première fois dans la liste des matériaux optionnels pour les conteneurs de transport de type A et B. Parallèlement, les grandes entreprises de production d'isotopes ont commencé à acquérir des ensembles complets de composants de blindage de chambre chaude en alliage de tungstène, ce qui a permis la maturation des technologies de forgeage de billettes de grande taille en alliage de tungstène, d'usinage de trous profonds et de soudage de composites multicouches. Le poids d'un conteneur est passé de quelques kilogrammes à plusieurs tonnes, et la gamme de produits a couvert l'ensemble des dimensions, du micro au géant.

La quatrième étape (de la deuxième décennie du XXI<sup>e</sup> siècle à nos jours) est une période de développement fulgurant et complet en matière d'intégration, d'intelligence et de technologies vertes. Les conteneurs de blindage en alliage de tungstène ne sont plus de simples « conteneurs métalliques », mais sont devenus des systèmes de blindage intelligents intégrant la surveillance de la dose, le déplacement automatique de la source, l'équilibrage de la pression, l'ouverture et la fermeture à distance et l'autodiagnostic. Les technologies clés telles que les revêtements fonctionnels de surface, les matériaux d'étanchéité résistants aux radiations et les fenêtres d'observation en verre au plomb intégrées sont désormais produites localement ou peuvent être contrôlées indépendamment, ce qui permet une réduction significative des coûts. Parallèlement, un système en boucle fermée pour le recyclage et la réutilisation

#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT



des conteneurs de blindage en alliage de tungstène usagés a été mis en place, leur conférant ainsi de véritables caractéristiques écologiques tout au long de leur cycle de vie. Aujourd'hui, les conteneurs de blindage en alliage de tungstène sont passés du statut initial de « produits de luxe onéreux » à celui de composants standard « d'infrastructure » dans les centres de médecine nucléaire, les usines d'isotopes et les ateliers de contrôle qualité, marquant ainsi l'achèvement de l'évolution de cette technologie, du laboratoire au cœur même de l'industrie.

### 1.3.2 Percées technologiques dans l'application des alliages de tungstène dans les boîtiers de blindage

de tungstène ne ont connu plusieurs avancées technologiques décisives, passant d'un concept de laboratoire à un composant standard de la médecine nucléaire, de la production d'isotopes et des installations d'irradiation industrielle. Ces avancées ont non seulement considérablement réduit les difficultés et les coûts de fabrication, mais ont aussi fondamentalement élargi leurs applications en termes d'espace, de poids, de durée de vie et de conformité réglementaire, les transformant finalement d'une solution de pointe en la seule option légale.

La première étape clé a été la maturation de la technologie de formage quasi-fini pour les ébauches de grande taille et complexes. Les premiers conteneurs de blindage en alliage de tungstène étaient limités par la taille et la forme des ébauches, ce qui nécessitait un usinage modulaire et un assemblage par brasage. Il en résultait des joints qui constituaient des points faibles du blindage et des zones inaccessibles au nettoyage. Grâce aux avancées dans le pressage isostatique à froid, le pressage isostatique à chaud et les technologies de moules ultra-larges, le poids et la complexité des ébauches frittées intégrées ont considérablement augmenté. Le formage monobloc de l'ensemble du corps du conteneur et des cavités internes de formes irrégulières est devenu une réalité, éliminant complètement les joints et améliorant simultanément la continuité du blindage et la résistance structurelle. Cette avancée a directement stimulé le développement d'une gamme complète de produits, allant des conteneurs miniatures pour sources médicales aux grands conteneurs de transfert de déchets.

La deuxième étape importante consiste à concevoir un système tungstène-nickel-cuivre (TTC-CCP) non magnétique et résistant à la corrosion. Si les alliages TTC-nickel-fer traditionnels offrent une grande résistance, ils génèrent des interférences magnétiques inacceptables dans les environnements de médecine nucléaire compatibles avec l'IRM et présentent une résistance à la corrosion relativement insuffisante. Grâce à un contrôle précis de la teneur en cuivre et des procédés de frittage, le système TTC-CCP est totalement amagnétique et présente une quasi-inertie chimique en milieu humide, en présence de détergents chlorés et de déchets liquides acides. Cette avancée majeure a permis, pour la première fois, l'utilisation à grande échelle de conteneurs de blindage en alliage de tungstène dans les salles de TEP-TDM, les chambres chaudes des cyclotrons et les lignes de distribution de produits de haute activité, levant ainsi tous les obstacles à leur application dans les applications médicales courantes.

La troisième avancée majeure a résidé dans la maîtrise de l'usinage des trous borgnes profonds et de la technologie de formage intégral pour les parois ultra-épaisses. Les réservoirs blindés nécessitent souvent des cavités internes extrêmement profondes et des zones de blindage localement ultra-épaisses, pour

#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

lesquelles les méthodes de perçage traditionnelles sont inefficaces et génèrent des taux de rebut élevés. Le perçage profond, le rodage des trous profonds, l'usinage électrolytique assisté par ultrasons et l'amélioration de la forgeabilité des billettes d'alliage de tungstène à fort rapport d'aspect ont permis de relever le défi du formage en une seule étape des trous borgnes dont le rapport d'aspect dépasse 20. L'obtention d'un état de surface miroir à l'intérieur du réservoir est ainsi devenue une pratique courante, améliorant considérablement l'efficacité de la décontamination et réduisant le volume des déchets secondaires.

La quatrième étape majeure réside dans l'avancée systémique en matière de revêtements fonctionnels et de conception intégrée. Les premiers conteneurs de blindage en alliage de tungstène ne bénéficiaient que d'un simple polissage de surface, ce qui limitait leur résistance aux rayures et à la contamination. La standardisation de modules fonctionnels tels que le nickelage chimique, les revêtements de nettoyage résistants aux radiations, les couches anti-oxydation  $\text{MoSi}_2$  haute température, les fenêtres d'observation en verre au plomb intégrées, les interfaces de surveillance de dose et les vannes d'équilibrage de pression a transformé les conteneurs de blindage, passant de simples dispositifs de confinement et de protection à des systèmes intelligents multifonctionnels (surveillance, exploitation et transport), améliorant considérablement leur facilité d'utilisation et leur redondance en matière de sécurité.

La cinquième étape consiste à mettre en place un système en boucle fermée pour le recyclage et la réutilisation complets des conteneurs de blindage en alliage de tungstène usagés. La nature totalement non toxique de l'alliage de tungstène, ainsi que sa capacité à être fondu et pulvérisé à plusieurs reprises, permettent de réintégrer ces conteneurs dans la chaîne de production avec un taux de recyclage proche de 100 %, garantissant ainsi un cycle de vie complet et écologique. Cette avancée majeure élimine totalement les préoccupations des clients concernant l'accumulation de métaux lourds et l'élimination finale, et confère également aux conteneurs de blindage en alliage de tungstène une exemption permanente aux réglementations les plus strictes en matière de gestion des déchets radioactifs, faisant d'eux un matériau de blindage véritablement écologique.

Les avancées successives réalisées dans ces cinq domaines clés, progressant étape par étape et de manière interdépendante, ont finalement propulsé les conteneurs de blindage en alliage de tungstène à l'avant-garde de l'ingénierie de la radioprotection. Ensemble, elles constituent une chaîne technologique complète, des matériaux au recyclage, en passant par la mise en forme, la transformation et le traitement de surface. Cette chaîne permet aux conteneurs de blindage en alliage de tungstène de surpasser les conteneurs en plomb et en béton en termes de performance, tout en présentant des avantages considérables en matière d'efficacité économique, de conformité réglementaire et de respect de l'environnement. Ils constituent ainsi l'un des exemples les plus représentatifs et les plus réussis de substitution de matériaux dans le domaine contemporain de la radioprotection.

### 1.3.3 Valeur fondamentale des boîtiers de protection en alliage de tungstène dans le secteur industriel

de tungstène ont depuis longtemps dépassé le stade d'un simple composant. Ils ont profondément transformé et soutenu en permanence l'efficacité opérationnelle, le niveau de sécurité et les capacités de

#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

développement durable de l'ensemble de la chaîne industrielle des isotopes radioactifs et des applications des rayonnements, sous une forme trois-en-un : « technologies clés habilitantes + plateforme systématique de réduction des coûts + infrastructure de conformité environnementale ».

Tout d'abord, il s'agit du véritable moteur de la révolution spatiale et économique dans le secteur de la médecine nucléaire et des isotopes. Les systèmes de blindage au plomb traditionnels nécessitent des parois épaisses et lourdes pour les chambres chaudes, une emprise au sol considérable et des coûts élevés en génie civil et en levage. À l'inverse, les cuves de blindage en alliage de tungstène permettent un contrôle de dose équivalent, voire supérieur, avec des parois bien plus fines que celles du plomb, ce qui se traduit par une réduction de 30 à 50 % de la surface des chambres chaudes des nouveaux centres PET-CT, des usines pharmaceutiques à cyclotron et des lignes de distribution de haute activité. Il en résulte une baisse significative des investissements dans la construction et le blindage. Plus important encore, leur conception compacte offre une plus grande flexibilité dans l'agencement des équipements, permettant d'intégrer davantage de lignes de production ou d'accélérateurs dans un même bâtiment. Ceci multiplie l'efficacité de production par unité de surface, contribuant directement à l'expansion exponentielle des capacités mondiales de production d'imagerie en médecine nucléaire et de produits radiopharmaceutiques observée ces quinze dernières années.

Deuxièmement, c'est la seule voie réaliste pour la transition écologique de la chaîne industrielle face à des réglementations de plus en plus strictes. À l'échelle mondiale, l'absence de plomb est passée d'une recommandation à une obligation. L'acquisition, l'utilisation, la décontamination et l'élimination finale des conteneurs en plomb sont soumises à des seuils environnementaux et à des sanctions économiques toujours plus élevés. Les réservoirs de protection en alliage de tungstène, en revanche, répondent intrinsèquement aux réglementations les plus strictes et peuvent être exemptés d'office, sans aucune modification supplémentaire. Cela permet non seulement aux entreprises manufacturières de réaliser d'importantes économies sur la lutte contre la pollution au plomb, mais aussi d'éviter le risque d'obstruction des études d'impact environnemental des projets ou d'arrêts de production dus à la présence de conteneurs en plomb. Cette solution devient ainsi une norme de conformité pour les nouvelles usines d'isotopes et la rénovation des installations existantes.

Troisièmement, l'absence totale de pollution secondaire tout au long de son cycle de vie et sa recyclabilité quasi-totale mettent fin au cercle vicieux des matériaux de blindage traditionnels, coûteux à l'usage et encore plus onéreux à la mise au rebut. Les boîtes de blindage en alliage de tungstène usagées peuvent être directement réintroduites dans le four de fusion comme matières premières de haute qualité, tandis que les boîtes en plomb doivent être traitées comme déchets dangereux, un processus dont les coûts d'élimination sont souvent plusieurs fois supérieurs au prix d'achat. Cette caractéristique d'économie circulaire des boîtes de blindage en alliage de tungstène rend leur coût total de possession nettement inférieur à celui des boîtes en plomb après huit à dix ans d'utilisation, un facteur déterminant pour la viabilité économique à long terme de la filière.

Quatrièmement, sa grande fiabilité et sa longue durée de vie réduisent considérablement l'intensité des opérations et de la maintenance, ainsi que le risque d'arrêts imprévus. Une cuve blindée en alliage de tungstène de haute qualité peut facilement dépasser vingt ans de durée de vie en utilisation normale, sans

#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

presque aucune maintenance requise pendant cette période, et sans qu'il soit nécessaire de remplacer régulièrement le revêtement ou de procéder à des réparations par soudure. En revanche, les cuves en plomb présentent souvent des problèmes de fluage, de fissuration et de contamination irréversible après environ cinq ans. Cela signifie qu'à capacité de production égale, le système de blindage en alliage de tungstène nécessite moins de cuves de rechange, réduit la fréquence d'ouverture de la chambre chaude et diminue la dose de rayonnement reçue par le personnel. Son efficacité opérationnelle globale et son niveau de santé au travail sont nettement supérieurs à ceux des systèmes traditionnels. Enfin, en tant que produit final à forte valeur ajoutée de la filière tungstène, les cuves blindées en alliage de tungstène ont stimulé les améliorations technologiques et l'expansion des capacités tout au long de la chaîne en amont, y compris la poudre de tungstène, les billettes, la transformation et le traitement de surface, créant ainsi un important effet de rétroaction positive. C'est le flux continu de commandes de boîtiers de blindage haut de gamme qui a soutenu l'itération continue d'une série de processus stratégiques tels que le pressage isostatique à chaud à grande échelle, le traitement des trous borgnes ultra-profonds et les revêtements fonctionnels, permettant à l'industrie chinoise du tungstène de maintenir une position forte aux extrémités amont et aval de la chaîne de valeur mondiale.



CTIA GROUP LTD Boîtier de blindage en alliage de tungstène



## Chapitre 2 Mécanisme de blindage et indicateurs de performance des boîtiers de blindage en alliage de tungstène

### 2.1 Principes de base du blindage contre les radiations dans les boîtiers de blindage en alliage de tungstène

Les conteneurs de blindage en alliage de tungstène reposent sur le mécanisme d'atténuation composite des rayonnements ionisants par des alliages à haute densité. Leur principe repose sur le dépôt rapide d'énergie et l'atténuation exponentielle des rayons gamma, des rayons X et des flux de neutrons grâce à la densité électronique et au numéro atomique extrêmement élevés du matériau. Parallèlement, leur conception structurelle et fonctionnelle intègre le blindage de confinement, la facilité d'utilisation et la facilité de décontamination. Contrairement au blindage traditionnel au plomb, qui repose uniquement sur l'effet photoélectrique, ou au béton, qui repose sur le ralentissement stéréotaxique, le blindage en alliage de tungstène constitue un système de blindage à large spectre et très efficace, basé sur l'effet photoélectrique, la diffusion Compton, la génération de paires d'électrons et les effets synergiques de la diffusion inélastique et élastique des neutrons. De ce fait, il s'agit de la seule approche technologique en médecine nucléaire, en production d'isotopes, en contrôle industriel des défauts et dans les installations d'irradiation scientifique permettant de satisfaire simultanément aux exigences de contrôle du débit de dose, de protection optimale et de conformité réglementaire, tout en respectant des contraintes d'espace et de poids.

#### 2.1.1 Analyse des caractéristiques de propagation des rayonnements ionisants dans les boîtiers de protection en alliage de tungstène

tungstène protègent principalement contre les rayons gamma, les rayons X, les neutrons rapides, les neutrons thermiques et les rayonnements secondaires associés. Leurs caractéristiques de propagation et la distribution de leur spectre énergétique déterminent le choix du matériau de blindage et la conception de sa structure.

Les rayons gamma et les rayons X de haute énergie sont des rayonnements ionisants indirects dotés d'un fort pouvoir de pénétration. Ils perdent de l'énergie dans la matière principalement par trois mécanismes : l'effet photoélectrique, la diffusion Compton et la production de paires électron-électron. Les alliages de tungstène, grâce à leur numéro atomique élevé et à leur forte densité électronique, conservent un coefficient de décroissance massique extrêmement élevé sur une large gamme d'énergies. En particulier, dans la gamme d'énergie caractéristique des rayons gamma produits par le cobalt-60 et le césium-137, couramment utilisés en médecine nucléaire, ainsi que dans les accélérateurs linéaires médicaux et les cyclotrons, l'effet photoélectrique et la production de paires électron-électron sont prédominants, ce qui rend leur efficacité de dépôt d'énergie bien supérieure à celle du plomb, du fer ou du béton. Parallèlement, la densité élevée des alliages de tungstène induit un libre parcours moyen plus court pour une même masse de couche de blindage. Les rayons subissent davantage d'interactions au sein de la paroi du conteneur, ce qui entraîne une décroissance exponentielle plus rapide et une réduction d'un ordre de grandeur du débit de dose à la surface externe.

#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

Les neutrons rapides et les neutrons thermiques sont principalement présents dans les canaux d'irradiation des réacteurs de recherche, les dispositifs de thérapie par capture de neutrons au bore et certains procédés de production d'isotopes. Les neutrons rapides perdent rapidement de l'énergie par diffusion inélastique et élastique ; les alliages de tungstène, grâce à leur densité nucléonique extrêmement élevée, sont d'excellents modérateurs de neutrons rapides. Les neutrons thermiques, quant à eux, sont principalement capturés et produisent des rayons gamma secondaires. L'ajout de fer et de traces de terres rares dans le système tungstène-nickel-fer peut améliorer significativement la section efficace d'absorption des neutrons thermiques, tandis que le système tungstène-nickel-cuivre obtient le même résultat grâce à des couches de borure externes ou internes. Les conteneurs de blindage pratiques utilisent souvent une conception hybride « corps en alliage de tungstène + couche composite locale absorbant les neutrons » afin de maintenir la résistance structurelle tout en assurant un blindage combiné gamma-neutron.

Le rayonnement secondaire comprend les photons diffusés par effet Compton, les photons d'annihilation, les rayons X caractéristiques, le rayonnement de freinage et les rayons gamma issus de la capture de neutrons. Bien que ces rayonnements secondaires aient généralement une énergie inférieure à celle du rayonnement primaire, leur proximité avec la surface externe du conteneur en fait un facteur limitant important pour le contrôle de la dose. Les conteneurs blindés en alliage de tungstène, grâce à une conception précise du gradient d'épaisseur des parois et à un revêtement en aluminium à faible numéro atomique (Z) sur la surface interne, garantissent la réabsorption ou la diffusion du rayonnement secondaire avant sa fuite, éliminant ainsi complètement le problème de « fuite de rayonnement secondaire » fréquent dans les conteneurs en plomb traditionnels.

De plus, les alliages de tungstène présentent des microstructures extrêmement stables sous irradiation prolongée, ne produisant quasiment aucun produit d'activation ni gonflement gazeux, ce qui minimise la dégradation de leurs performances de blindage au fil du temps. À l'inverse, des matériaux comme le plomb, le béton et les plastiques contenant du bore présentent tous des degrés variables de dégradation de leurs performances sous une même dose de rayonnement. C'est précisément cette compréhension approfondie et cette approche systématique des caractéristiques de propagation et des mécanismes d'interaction susmentionnés qui permettent aux conteneurs de blindage en alliage de tungstène d'offrir un blindage véritablement « à large spectre, efficace et durable » dans des champs de rayonnement mixtes complexes, ce qui en fait la solution de blindage la plus fiable scientifiquement et la plus performante techniquement dans le domaine de la radioprotection contemporaine.

### **2.1.2 Mécanisme de blindage des boîtiers de blindage en alliage de tungstène (absorption et atténuation)**

tungstène repose essentiellement sur un processus de dépôt d'énergie et de décroissance exponentielle de l'intensité, dû à de multiples interactions entre photons et neutrons de haute énergie dans des matériaux composites haute densité, plutôt que sur un simple blocage géométrique. Son mécanisme de décroissance présente des caractéristiques spécifiques à chaque étape, dépendant du type et de l'énergie des particules incidentes. Toutefois, il conserve toujours une efficacité globale extrêmement élevée, permettant ainsi une réduction drastique de la dose reçue d'une source radioactive de haute activité jusqu'au niveau de fond à la surface extérieure, dans une épaisseur de paroi finie.

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

Pour les rayons gamma et les rayons X de haute énergie, les alliages de tungstène présentent une prédominance de l'effet photoélectrique aux basses énergies. Les électrons des couches K, L et M des atomes de tungstène sont directement éjectés, la quasi-totalité de leur énergie étant convertie en énergie cinétique photoélectronique et en rayons X caractéristiques. Ces rayons X sont ensuite réabsorbés par effet photoélectrique par les atomes environnants, entraînant un dépôt d'énergie local rapide. Aux énergies moyennes, la diffusion Compton devient prédominante. Les photons incidents subissent des collisions inélastiques avec les électrons des couches externes, ce qui randomise l'énergie et la direction des photons diffusés. La diffusion répétée conduit finalement à une diminution progressive de l'énergie des photons jusqu'à l'absorption photoélectrique. Aux hautes énergies, la formation de paires électron-trou devient prédominante. Les photons incidents sont convertis en paires électron-positron dans le champ électrique intense des noyaux atomiques. Ces paires continuent ensuite à perdre de l'énergie par ionisation et rayonnement de freinage jusqu'à ce que toute l'énergie soit déposée. Ces trois mécanismes se chevauchent fortement au sein de l'alliage de tungstène en raison de son libre parcours moyen extrêmement court, ce qui entraîne une décroissance strictement exponentielle de l'intensité des rayons X et une couche de demi-atténuation beaucoup plus petite que le plomb ou l'acier.

Dans le cas des neutrons rapides, l'alliage de tungstène induit d'abord une collision violente entre le neutron et le noyau de tungstène par diffusion inélastique, transférant instantanément une grande quantité d'énergie cinétique et générant des neutrons secondaires et des rayons gamma. Par la suite, de multiples diffusions élastiques réduisent encore l'énergie du neutron, lui permettant finalement d'atteindre le domaine des neutrons thermiques où il est efficacement capturé par le fer, les terres rares ou une couche externe de bore. Ce processus se déroule extrêmement rapidement dans les matériaux à haute densité nucléaire, affaiblissant considérablement le pouvoir de pénétration des neutrons rapides. Les rayons gamma instantanément générés après la capture du neutron thermique ont une faible énergie et sont ensuite absorbés photoélectriquement ou diffusés par effet Compton par l'alliage de tungstène lui-même, assurant ainsi un blindage en boucle fermée.

Le contrôle du rayonnement secondaire constitue un avantage majeur des conteneurs de blindage en alliage de tungstène par rapport aux matériaux traditionnels. Le plomb produit, après absorption photoélectrique, des rayons X caractéristiques de haute énergie, susceptibles de s'échapper, tandis que le tungstène produit des rayons X caractéristiques de plus basse énergie, plus facilement réabsorbés par ses parois épaisses. Parallèlement, la densité électronique extrêmement élevée des alliages de tungstène entraîne la génération de rayonnement de freinage et de photons d'annihilation plus près de la surface interne, ce qui réduit considérablement la probabilité d'échappement. Cette localisation de la génération et de l'absorption signifie que la surface externe du conteneur de blindage en alliage de tungstène est quasiment dépourvue des points chauds de rayonnement secondaire fréquents dans les conteneurs en plomb traditionnels, garantissant ainsi une distribution de dose extrêmement uniforme.

Ce sont précisément ces caractéristiques du système, à savoir la synergie multi-mécanismes, le dépôt d'énergie local et l'autoconsommation du rayonnement secondaire, qui permettent aux conteneurs de blindage en alliage de tungstène d'atteindre une atténuation véritablement à large spectre et efficace dans des champs de rayonnement mixtes complexes, ce qui en fait la barrière de contrôle de dose la plus fiable

#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT



dans les cellules chaudes de médecine nucléaire, les lignes de production d'isotopes et les installations d'irradiation industrielles.

#### 2.1.2.1 Corrélation entre la structure atomique du tungstène et les performances de blindage des boîtiers de blindage en alliage de tungstène

Les atomes de tungstène, grâce à leur configuration électronique et leurs caractéristiques nucléaires uniques, constituent le fondement microscopique des performances de blindage supérieures des conteneurs en alliage de tungstène. Ces atomes possèdent un numéro atomique élevé et leur configuration électronique externe présente une structure de couches internes complète. Les énergies de liaison des couches K, L et M augmentent séquentiellement et correspondent parfaitement aux énergies des rayons gamma couramment utilisés en médecine nucléaire et pour le contrôle qualité industriel. Ceci induit une augmentation significative de la section efficace d'absorption photoélectrique à ces énergies caractéristiques, formant ainsi une « fenêtre d'absorption » naturelle. Lorsque l'énergie du photon incident dépasse légèrement l'énergie de liaison d'une certaine couche, la probabilité de l'effet photoélectrique augmente fortement, la quasi-totalité de l'énergie étant transférée aux photoélectrons en une seule impulsion. Les rayons X caractéristiques ainsi produits, du fait de leur plus faible énergie, sont alors rapidement réabsorbés par les atomes voisins. Ce processus d'absorption en cascade est particulièrement efficace dans les alliages à haute teneur en tungstène, en raison de l'espacement interatomique extrêmement faible.

La masse nucléaire élevée et le champ coulombien intense des atomes de tungstène accentuent l'effet de seuil des photons de haute énergie générant des paires d'électrons près du noyau, ce qui se traduit par une efficacité de conversion bien supérieure à celle des éléments de faible numéro atomique (Z). Simultanément, la forte liaison des électrons externes au sein du noyau de tungstène confère aux électrons diffusés par effet Compton une énergie de rétro-impulsion plus importante, facilitant leur échappement des orbitales atomiques et le déclenchement de chaînes d'ionisation secondaires, conduisant ainsi à un dépôt d'énergie plus complet. Le faible rayon atomique et la forte densité de particules du tungstène permettent d'obtenir un plus grand nombre de cibles d'interaction par unité de volume, réduisant considérablement le libre parcours moyen. Ce phénomène se manifeste macroscopiquement par une décroissance de plusieurs ordres de grandeur, même avec des parois extrêmement fines.

En protection neutronique, la masse élevée et l'abondance des isotopes du tungstène lui confèrent d'excellentes propriétés de diffusion inélastique, lui permettant d'absorber une grande quantité d'énergie cinétique des neutrons lors d'une seule collision. Parallèlement, la densité nucléonique extrêmement élevée des atomes de tungstène induit de fréquentes diffusions élastiques, créant ainsi un canal de ralentissement rapide. La faible section efficace d'activation neutronique du tungstène garantit qu'il ne deviendra pas une nouvelle source de rayonnement après une irradiation prolongée, ce qui est essentiel pour la capacité de confinement à long terme de l'enceinte de blindage.

de tungstène dans l'alliage permet de transposer intégralement à l'échelle macroscopique les avantages microscopiques mentionnés précédemment. La phase liante sert uniquement à consolider et à renforcer la structure, sans pour autant affaiblir le rôle prépondérant des atomes de tungstène. En définitive, cela

#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

confère au conteneur de blindage en alliage de tungstène des caractéristiques d'atténuation très efficaces, sans zones de faiblesse significatives, sur l'ensemble du spectre, des rayons X de basse énergie aux rayons gamma de haute énergie et des neutrons rapides aux neutrons thermiques. Cette chaîne causale rigoureuse « structure atomique → mécanisme microscopique → performance macroscopique » explique fondamentalement pourquoi les conteneurs de blindage en alliage de tungstène peuvent atteindre une efficacité de protection équivalente, voire supérieure, avec une épaisseur de paroi bien inférieure à celle des matériaux traditionnels. Ils constituent ainsi l'exemple parfait d'intégration structure-fonction dans le domaine des matériaux de blindage contre les rayonnements.

### 2.1.2.2 Processus d'interaction des conteneurs de blindage en alliage de tungstène avec différents types de rayonnements

Le réservoir de blindage en alliage de tungstène présente des étapes claires et une synergie dans son interaction avec différents types de rayonnement dans des champs de rayonnement mixtes réels, formant une chaîne complète de dépôt d'énergie depuis le rayonnement incident de haute énergie jusqu'au rayonnement de fond.

Les rayons gamma de haute énergie sont initialement générés près de la paroi interne du conteneur, principalement par effet photoélectrique ou par appariement électron-électron. Leur énergie est convertie en photoélectrons, positrons et photons d'annihilation, soit en une seule étape, soit par étapes. Ces particules chargées transfèrent rapidement leur énergie cinétique au réseau cristallin du matériau à haute densité électronique par ionisation et rayonnement de freinage, sur une distance thermique extrêmement courte, de l'ordre du micromètre. Les photons secondaires générés, dont l'énergie est considérablement réduite, subissent ensuite une diffusion Compton ou une absorption photoélectrique supplémentaire dans les couches externes, formant un mode de décroissance par gradient typique d'« absorption forte dans la couche interne et diffusion faible dans la couche externe ». Finalement, presque aucun photon de haute énergie ne s'échappe de la surface externe.

Les rayons X de moyenne énergie et les rayons X utilisés en diagnostic médical sont principalement dus à la diffusion Compton. Les photons incidents subissent de multiples déviations directionnelles et une réduction d'énergie au sein de la paroi du récipient. Les photons réfléchis et les électrons de recul ont un libre parcours moyen extrêmement court dans ce milieu de haute densité et sont rapidement diffusés ou réabsorbés par les atomes suivants, pour finalement être convertis en photons diffusés de faible énergie, uniformément répartis, et en énergie thermique. Ce processus de diffusion multiple entraîne une décroissance exponentielle de l'intensité des rayons X, et les photons diffusés ont peu de chances de se disperser de manière directionnelle.

Les neutrons perdent la majeure partie de leur énergie cinétique par diffusion inélastique avec les noyaux de tungstène de la couche externe du conteneur, produisant des neutrons secondaires et des rayons gamma. Ensuite, dans les couches internes, ils sont ralentis jusqu'au domaine des neutrons thermiques par diffusion élastique avec les noyaux de tungstène et de fer. Les neutrons thermiques sont efficacement capturés par le fer, les terres rares ou une couche de bore ajoutée. Les rayons gamma capturés,

#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

de faible énergie, sont ensuite photoabsorbés par l'alliage de tungstène lui-même. L'ensemble du processus ne génère quasiment aucune fuite de rayonnement secondaire de haute énergie.

Les neutrons thermiques et les rayons gamma de faible énergie sont principalement capturés directement ou absorbés photoélectriquement dans les alliages de tungstène, ce qui entraîne un dépôt d'énergie très localisé et une quasi-absence de particules secondaires susceptibles de s'échapper. La très faible section efficace d'activation et la température de recristallisation élevée des alliages de tungstène garantissent qu'ils ne deviennent pas de nouvelles sources de rayonnement après une irradiation de longue durée, et que leurs performances de blindage restent constantes dans le temps.

C'est ce processus de « superposition, de mécanisme et d'épuisement progressif » des différentes énergies et particules qui permet aux boîtiers de blindage en alliage de tungstène d'atteindre un véritable blindage à large bande « zéro fuite » dans des champs mixtes complexes, surpassant complètement les fenêtres de faiblesse naturelles des matériaux traditionnels tels que le plomb et le béton dans une certaine gamme d'énergie.

### **2.1.2.3 Effet optimisant de la composition de l'alliage sur le mécanisme de blindage des boîtiers de blindage en alliage de tungstène**

La maîtrise précise de la composition de l'alliage est essentielle pour transformer le mécanisme de blindage des boîtes de protection en alliage de tungstène, passant d'un avantage intrinsèque lié à la dominance du tungstène à une solution optimale adaptée à chaque situation. Grâce à une optimisation systématique du type, de la proportion et des éléments traces de la phase liante, une adaptation poussée aux différents types de rayonnements, environnements chimiques et durées de vie est possible.

Le nickel, en tant que liant central, assure la formation d'une structure continue pour les particules de tungstène tout en conférant une ténacité suffisante pour prévenir la rupture fragile du tungstène pur. Il augmente également la densité du frittage en phase liquide, rapprochant ainsi les performances de blindage macroscopique de la limite théorique. L'ajout de fer améliore significativement la diffusion inélastique des neutrons et le piégeage des neutrons thermiques, tout en renforçant la résistance à haute température et au gonflement sous irradiation. Le système tungstène-nickel-fer s'impose ainsi comme le choix privilégié pour les champs de mélange de neutrons gamma et les applications d'irradiation à haute température. L'introduction de cuivre élimine totalement le magnétisme et améliore considérablement la résistance à la corrosion par piqûres et à la corrosion uniforme dans les détergents acides, les déchets liquides chlorés et les environnements humides. Le système tungstène-nickel-cuivre est donc le seul choix possible pour les cellules chaudes de médecine nucléaire compatibles IRM et les conteneurs de déchets liquides.

L'ajout ciblé de traces de terres rares (comme le lanthane et l'yttrium) ou de bore et de gadolinium optimise davantage la section efficace de piégeage des neutrons thermiques et la résistance au gonflement dû aux irradiations, tout en affinant le grain, en limitant le glissement intergranulaire et en améliorant la stabilité géométrique lors d'une utilisation prolongée. La proportion de la phase liante détermine directement l'équilibre résistance-ténacité de l'alliage : les alliages à haute teneur en tungstène et faible

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

teneur en phase liante présentent une résistance supérieure et une meilleure efficacité de blindage, mais sont plus difficiles à usiner et conviennent aux réservoirs fixes à parois épaisses ; une augmentation modérée de la phase liante améliore significativement l'aptitude au formage à chaud et à froid ainsi que la résistance aux chocs, ce qui les rend adaptés aux conteneurs de transport et aux réservoirs à chambre chaude soumis à des ouvertures fréquentes.

L'optimisation de la composition a abouti à un système de nuances quadridimensionnel intégrant les critères suivants : scénario, spectre de rayonnement, environnement chimique et durée de vie. Les réservoirs pour sources médicales de rayons gamma purs à haute activité utilisent des nuances à haute teneur en tungstène, tungstène-nickel-cuivre, non magnétiques et résistantes à la corrosion. Les réservoirs pour canaux d'irradiation des réacteurs de recherche utilisent des nuances à forte absorption neutronique en tungstène-nickel-fer avec des traces de gadolinium. Les réservoirs de stockage de liquides usés utilisent des nuances à haute teneur en cuivre et en nickel, et ultra-résistantes à la corrosion. Enfin, les réservoirs pour chambres chaudes à haute température utilisent des nuances à faible teneur en liant et à haute résistance. Ce mécanisme d'optimisation basé sur la composition a transformé les réservoirs de blindage en alliage de tungstène, initialement conçus comme un matériau unique et polyvalent, en un ensemble de solutions de blindage précisément adaptées aux besoins, permettant ainsi une intégration parfaite des performances de blindage aux exigences techniques réelles.

### **2.1.3 Analyse des facteurs affectant l'effet de blindage des boîtiers de blindage en alliage de tungstène**

tungstène ne résultent pas d'une simple application linéaire des propriétés théoriques du matériau, mais plutôt de l'interaction de multiples facteurs, notamment les propriétés intrinsèques du matériau, la géométrie de la structure, le processus de fabrication, l'état de surface et les conditions d'utilisation. Même une légère variation de l'un de ces facteurs peut entraîner une augmentation inacceptable du débit de dose en surface. Par conséquent, en pratique, tous les facteurs influents doivent être intégrés dans un système de contrôle en boucle fermée tout au long du processus afin de garantir une marge de sécurité suffisante pour chaque conteneur de protection, même dans les conditions d'utilisation les plus extrêmes.

#### **2.1.3.1 Propriétés intrinsèques des matériaux en alliage de tungstène**

Les propriétés intrinsèques des matériaux en alliage de tungstène sont les facteurs internes fondamentaux qui déterminent l'effet de protection, et comprennent principalement cinq dimensions clés : la teneur et la densité en tungstène, le type et l'uniformité de la phase liante, la microstructure, le niveau de contrôle des impuretés et la stabilité sous irradiation.

La teneur et la densité en tungstène déterminent directement la densité volumique macroscopique et la densité atomique, qui sont les principaux facteurs déterminants de l'efficacité du blindage. Une teneur en tungstène plus élevée et un frittage plus dense entraînent un plus grand nombre de cibles d'interaction par unité d'épaisseur, un libre parcours moyen plus court et une décroissance exponentielle plus rapide. Les pores, inclusions ou particules de tungstène non dissoutes se transforment en zones localisées de

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

faible densité, créant un potentiel « effet tunnel » des rayons X et affaiblissant considérablement la capacité de blindage globale.

Le type et l'uniformité de la phase liante, tout en garantissant une densité élevée, influencent fortement le contrôle du rayonnement secondaire et les performances à long terme. Les liants nickel-fer peuvent améliorer la modération des neutrons et la capture des neutrons thermiques, mais une distribution non homogène peut entraîner la capture de rayons gamma de haute énergie dans des zones localisées riches en fer. Bien que les liants nickel-cuivre soient non magnétiques et présentent une excellente résistance à la corrosion, une teneur excessive en cuivre peut légèrement diluer la densité atomique du tungstène, ce qui nécessite un compromis entre résistance à la corrosion et blindage. La ségrégation de la phase liante ou des résidus en phase liquide peut également créer des canaux de faible densité à l'échelle micrométrique, devenant des voies d'échappement privilégiées pour les photons de haute énergie. La microstructure est cruciale pour le comportement dynamique du blindage et sa résistance aux radiations. Idéalement, les particules de tungstène sont petites, rondes et uniformément réparties, formant une structure continue, tandis que la phase liante remplit entièrement les interstices. Une microstructure ayant subi une déformation plastique secondaire suffisante améliore considérablement la résistance au gonflement sous irradiation et à la migration des pores, permettant ainsi au conteneur de blindage de conserver sa précision géométrique et son épaisseur, même à des doses cumulées extrêmement élevées. À l'inverse, les particules de tungstène grossières ou les microstructures recristallisées sont sujettes à la fissuration des joints de grains et à une réduction de densité sous irradiation prolongée, ce qui entraîne une dégradation progressive de l'efficacité du blindage.

Le contrôle des niveaux d'impuretés est directement lié au rayonnement secondaire et aux produits d'activation. Des concentrations excessives d'impuretés telles que l'oxygène, le carbone, le soufre et le phosphore peuvent former des phases fragiles ou des pores lors du frittage. Plus grave encore, elles peuvent générer des nucléides radioactifs à longue durée de vie sous irradiation, devenant ainsi des sources de contamination interne pour l'enceinte de blindage elle-même. En particulier, les impuretés de carbone réagissent avec le tungstène pour former une couche fragile de carbure de tungstène, ce qui non seulement réduit la ténacité, mais génère également des neutrons et des rayons gamma supplémentaires sous bombardement de particules de haute énergie. La stabilité sous irradiation est le facteur le plus souvent négligé, mais pourtant le plus déterminant, pour l'efficacité du blindage à long terme parmi les propriétés des matériaux. Les alliages de tungstène de haute qualité ne présentent quasiment aucun gonflement volumique, aucune perte de résistance ni aucun produit d'activation sous irradiation à haute dose, tandis que les alliages de qualité inférieure peuvent subir une accumulation de vides aux joints de grains, une précipitation de la phase liante ou une propagation de microfissures, entraînant à terme une réduction de l'épaisseur effective de la paroi et des fuites de dose.

### 2.1.3.2 Paramètres de conception de la structure de blindage

Les paramètres de conception de la structure de blindage sont essentiels pour que les réservoirs de blindage en alliage de tungstène tirent pleinement parti des avantages du matériau et s'avèrent efficaces. Ils comprennent principalement cinq éléments clés : la répartition de l'épaisseur des parois, la géométrie

#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT



des cavités, le traitement des joints et des interfaces, la conception des couches à gradient et les composants de blindage auxiliaires intégrés.

L'uniformité de la distribution de l'épaisseur des parois et leur épaisseur minimale déterminent directement la capacité d'atténuation du maillon le plus faible. Une conception idéale exige que l'épaisseur minimale de pénétration de tous les trajets de rayons soit constante afin d'éviter que les zones localement fines ne deviennent des canaux de fuite de dose. En pratique, le principe d'un débit de dose égal sur la surface externe est souvent adopté. L'épaisseur des parois est localement augmentée ou diminuée par simulation de tracé de rayons par éléments finis, de sorte que le champ de dose sur la surface externe soit très uniforme.

La géométrie de la cavité influe considérablement sur la diffusion et la réabsorption du rayonnement secondaire. Les cavités cylindriques ou sphériques maximisent le trajet moyen des rayons à l'intérieur des parois, réduisant ainsi les fuites directes. En revanche, les cavités rectangulaires sont sujettes à l'accumulation de photons diffusés aux angles, ce qui nécessite une compensation par des angles arrondis ou un épaississement local. Les cavités profondes à fond borgne garantissent que l'épaisseur de la paroi inférieure est au moins égale au minimum calculé ; dans le cas contraire, un effet de cheminée typique se produit.

Les joints, les ouvertures du couvercle et les interfaces constituent les points faibles les plus courants des conteneurs blindés traditionnels. Les conteneurs blindés en alliage de tungstène éliminent totalement les joints traversants grâce à un moulage intégré, un couvercle à structure étagée complexe, des joints d'étanchéité intégrés et un soudage de qualité métallurgique ou par faisceau d'électrons. L'atténuation de la zone du joint est ainsi égale, voire supérieure, à celle du corps principal. Les ouvertures fonctionnelles, telles que les fenêtres d'observation, les orifices de sonde et les interfaces des tubes de perfusion, utilisent une structure de blindage étagée en alliage de tungstène combinée à du verre au plomb ou du polyéthylène borosilicaté afin d'empêcher toute transmission directe de la lumière vers l'ouverture.

La couche à gradient et le blindage auxiliaire intégré optimisent davantage les performances à large bande. La couche de transition externe à faible teneur en tungstène limite la fuite des électrons secondaires de haute énergie, tandis que le revêtement composite interne à haute teneur en bore ou en hydrogène absorbe efficacement les neutrons thermiques et supprime la capture des rayons gamma. La grille ou le collimateur intégré en alliage de tungstène est utilisé dans les conteneurs de sources médicales à forte concentration pour obtenir un blindage directionnel précis. L'intégration optimale de ces paramètres de conception a permis au conteneur de blindage en alliage de tungstène d'évoluer véritablement, passant d'un simple conteneur à parois épaisses à un système de blindage de troisième génération doté d'un compartimentage fonctionnel et de gradients intelligents.

### 2.1.3.3 Caractéristiques intrinsèques de la source de rayonnement

Le spectre énergétique, l'activité, la géométrie, la forme chimique et les caractéristiques de distribution temporelle de la source de rayonnement remettent directement en question la difficulté réelle de blindage

#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

du boîtier de blindage en alliage de tungstène, et déterminent également la marge de conception et la stratégie de sélection.

Les sources gamma de haute énergie (comme le cobalt-60 et les sous-produits des accélérateurs linéaires médicaux) possèdent un pouvoir de pénétration extrêmement élevé et nécessitent des parois d'une épaisseur maximale. Parallèlement, la proportion de photons de freinage et d'annihilation secondaires est importante, ce qui impose des parois externes plus épaisses et une conception de gradient plus précise. Les sources gamma de basse et moyenne énergie (comme l'iode-125 et l'iridium-192) sont dominées par l'effet photoélectrique, et l'épaisseur de paroi requise est nettement inférieure pour une même activité. Cependant, elles nécessitent une densité de matériau et une propreté de surface plus élevées afin d'éviter l'accumulation de photons diffusés de basse énergie.

Le niveau d'activité détermine le débit de dose total et la charge thermique. Les sources à haute activité nécessitent des conteneurs de blindage à très haute capacité d'atténuation en un seul passage, tandis que le dépôt de chaleur important à l'intérieur des parois impose la présence d'orifices de ventilation par convection ou de revêtements thermoconducteurs ; les sources à faible activité, quant à elles, sont davantage préoccupées par la difficulté d'activation et de décontamination des matériaux sous l'effet d'une dose cumulative à long terme.

La nature de la source influence la conception de la cavité et la marge de corrosion. Les sources ponctuelles permettent une atténuation géométrique optimale grâce à une cavité profonde et une structure de fond épaisse ; les sources volumiques ou liquides nécessitent des cavités plus grandes et des revêtements résistants à la corrosion, tout en empêchant le dépôt d'aérosols radioactifs dans les zones non couvertes. Les sources pulvérulentes ou gazeuses imposent des exigences plus élevées en matière d'étanchéité et de vanne d'équilibrage de pression.

Les caractéristiques de distribution temporelle déterminent les exigences de blindage dynamique. Les sources à courte période (comme le fluor-18) ont une durée de vie opérationnelle réduite et peuvent accepter des débits de dose initiaux légèrement plus élevés ; les sources à longue période (comme le césium-137 et le strontium-90) exigent que le conteneur de blindage conserve des constantes géométriques et de performance pendant des décennies, ce qui fait de la stabilité du matériau sous irradiation un facteur déterminant.

Ce sont précisément les caractéristiques en constante évolution de la source radioactive qui ont contraint les fabricants de conteneurs de blindage en alliage de tungstène à passer d'un produit standard unique à un modèle de « personnalisation de la source radioactive », garantissant ainsi à chaque type de source de rayonnement la solution de blindage dédiée la plus économique et la plus sûre.

#### 2.1.3.4 Facteurs influençant l'utilisation des conditions environnementales

Les conditions environnementales constituent le test d'acceptation final de l'effet de blindage des boîtiers de blindage en alliage de tungstène, et comprennent cinq aspects : le champ de température, l'humidité

#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT



et les milieux corrosifs, la charge mécanique, la dose d'irradiation cumulée et les conditions de travail inattendues.

Les environnements à haute température peuvent légèrement réduire la densité des alliages de tungstène et accélérer la diffusion de la phase liante, mais la dégradation des performances des alliages de tungstène de haute qualité est négligeable aux températures courantes des cellules chaudes de médecine nucléaire. Les températures extrêmement élevées (comme lors d'incendies) mettent à l'épreuve la température de recristallisation du matériau et l'intégrité du revêtement anti-oxydant. En cas de défaillance du revêtement, l'oxydation superficielle entraîne une réduction locale de la densité et des fuites de microdoses. L'humidité, les détergents acides et alcalins, les projections d'eau de mer ou les déchets liquides chlorés constituent les menaces chimiques les plus courantes. Les systèmes tungstène-nickel-cuivre présentent des films de passivation de surface stables et sont pratiquement exempts de corrosion dans ces environnements ; tandis que les systèmes tungstène-nickel-fer, bien que plus résistants, sont sujets à la corrosion intergranulaire en cas d'exposition prolongée et nécessitent un nickelage ou des revêtements de nettoyage spécifiques. Lorsque la corrosion provoque un décollement ou une piqûre de surface, celle-ci crée un canal de faible densité pour l'échappement préférentiel des rayonnements.

Les charges mécaniques comprennent les charges statiques (poids propre, empilement des déchets), les charges dynamiques (vibrations liées au transport, chutes) et les cycles de contraintes thermiques. Les alliages de tungstène présentent une excellente résistance à haute température et un faible coefficient de dilatation thermique, ce qui minimise la déformation géométrique sous ces charges et garantit une épaisseur de blindage constante. En revanche, les boîtiers en plomb traditionnels sont sujets au fluage dans les mêmes conditions, ce qui entraîne un élargissement de la zone de réduction d'épaisseur de paroi.

Une irradiation prolongée à forte dose peut provoquer un gonflement des trous, une fragilisation par l'hélium et l'accumulation de produits d'activation. Les alliages de tungstène de haute qualité, grâce à un affinement du grain, une purification des terres rares et une structure fibreuse pré-déformée, réduisent considérablement le gonflement et la fragilisation, ce qui se traduit par des niveaux extrêmement faibles de produits d'activation ; en revanche, les alliages de qualité inférieure peuvent subir une propagation de microfissures à des doses cumulées plus élevées, entraînant une dégradation progressive de l'efficacité du blindage.

Les conditions imprévues (incendie, inondation, séisme, chute, etc.) constituent le test ultime de l'efficacité du blindage. Le point de fusion élevé, l'incombustibilité et la grande ténacité de l'alliage de tungstène lui permettent de conserver son intégrité structurelle en cas d'incendie, de ne pas se briser en cas de chute et de ne pas se renverser lors d'un séisme, évitant ainsi des conséquences catastrophiques telles que la fusion et l'écoulement du plomb dans les réservoirs ou la fissuration et l'effondrement des réservoirs en béton.

La combinaison de ces facteurs environnementaux rigoureux impose, dès la conception du conteneur de blindage en alliage de tungstène, d'intégrer une simulation de couplage multiphysique et une marge de surdimensionnement. Ceci garantit un contrôle précis du débit de dose en surface externe, même dans

#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

les conditions les plus défavorables, le maintenant au niveau du rayonnement de fond et faisant de ce conteneur une barrière fiable et optimale pour le confinement et le blindage des matières radioactives.

#### 2.1.3.5 Facteurs affectant le contrôle de précision du processus de fabrication

La précision de fabrication est l'étape finale permettant d'atteindre l'efficacité de blindage optimale théorique des boîtiers en alliage de tungstène. C'est aussi le facteur le plus souvent négligé, mais aussi le plus critique. Le moindre écart géométrique, défaut de surface ou défaut résiduel interne peut se traduire directement par une fuite de rayonnement ou un point chaud de rayonnement secondaire, réduisant considérablement l'efficacité de blindage réelle du boîtier par rapport à la valeur nominale.

La densité et la régularité de la forme sont primordiales lors de la mise en forme des ébauches. Le pressage isostatique à froid, le pressage isostatique à chaud ou le pressage dans un moule de grande taille doivent garantir un remplissage uniforme en poudre de tungstène et une transmission de pression optimale, sans zones mortes. Dans le cas contraire, des zones de faible densité se formeront, créant des pores ou un retrait irrégulier lors du frittage ultérieur, et donc des zones de faible pénétration. De faibles variations des paramètres de frittage (profil de température, pureté de l'atmosphère, durée de maintien) peuvent entraîner une croissance irrégulière des particules de tungstène ou une ségrégation de la phase liante, affectant directement l'uniformité du micro-blindage.

La précision d'usinage des trous borgnes profonds et des cavités internes complexes détermine l'épaisseur minimale de paroi et l'état de surface. Les écarts de perçage, les défauts de circularité lors du rodage et la concentration des contraintes résiduelles au fond du trou peuvent entraîner une épaisseur minimale de paroi réelle inférieure de plusieurs points de pourcentage à la valeur nominale, provoquant ainsi une augmentation mesurable de la dose reçue dans un champ gamma de haute énergie. La rugosité et l'ondulation de la surface interne doivent être parfaitement maîtrisées ; à défaut, des micro-cavités deviendront des points d'adsorption permanents pour les poussières et aérosols radioactifs, compliquant la décontamination et créant des sources localisées de contamination après une accumulation prolongée.

L'ajustement précis entre le couvercle et la boîte, ainsi que le parallélisme de l'entrefer et de la surface d'étanchéité, déterminent directement la continuité du blindage au niveau de la jonction. Les boîtes en plomb traditionnelles présentent souvent un mauvais ajustement dû à la déformation du couvercle, tandis que les boîtes en alliage de tungstène bénéficient d'un ajustement parfait au micron près entre le couvercle et l'ouverture grâce à un usinage CNC de haute précision et à une mesure optique en ligne, éliminant ainsi tout jeu. Le contrôle microstructural des zones de soudage ou de fusion par faisceau d'électrons est tout aussi crucial ; la présence de gros grains recristallisés ou de microfissures dans la zone affectée thermiquement constitue un point faible inacceptable.

L'homogénéité du revêtement fonctionnel de surface et du polissage final constitue le dernier rempart contre la corrosion superficielle et la fuite d'électrons secondaires. Une épaisseur irrégulière du nickelage chimique, une adhérence insuffisante du revêtement de nettoyage ou des rayures résiduelles dues au polissage peuvent toutes se transformer en points d'amorçage de corrosion par piqûres ou en sources d'émission d'électrons après un nettoyage et une irradiation prolongés. Les conteneurs de blindage haut

#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

de gamme en alliage de tungstène intègrent toutes les dimensions et tous les paramètres de surface clés dans le processus de contrôle statistique SPC, complété par des essais non destructifs par tomographie aux rayons X, des contrôles ultrasonores multiéléments et la détection de fuites par spectrométrie de masse à l'hélium. Ceci garantit que les performances de blindage réelles de chaque conteneur en sortie d'usine sont parfaitement conformes aux valeurs théoriques calculées.

## 2.2 Système d'indices de performance clés des boîtiers blindés en alliage de tungstène

tungstène ne ont été dotées d'un système d'indicateurs complet, rigoureux et quantifiable, couvrant cinq dimensions : l'efficacité de protection, la sécurité structurelle, la durée de vie, la facilité d'utilisation et la conformité réglementaire. Ces indicateurs ne sont plus de simples paramètres matériels, mais des exigences systémiques interdépendantes qui, ensemble, constituent une norme d'évaluation globale, de la conception à la fabrication et à la réception.

Les critères d'efficacité du blindage sont axés sur l'épaisseur de paroi équivalente, le débit de dose en surface externe, la distribution angulaire des fuites de rayonnement et le niveau de contrôle du rayonnement secondaire. Ils exigent que, dans les conditions les plus défavorables et pour la durée de vie la plus longue, le débit de dose en tout point de la surface externe soit inférieur à une fraction de la limite réglementaire, sans fuite directionnelle. Les critères de sécurité structurelle comprennent la résistance aux chutes, la résistance aux charges statiques d'empilement, la résistance aux chocs thermiques et au renversement sismique, garantissant ainsi le maintien du confinement même dans les conditions les plus extrêmes et inattendues. Les critères de durée de vie englobent l'absence de défaillance due au vieillissement par irradiation, une précision géométrique constante, un facteur de décontamination de surface constant et la fiabilité à long terme du système d'étanchéité, nécessitant généralement une période sans maintenance d'au moins vingt ans.

Les indicateurs de facilité d'utilisation mettent l'accent sur l'ouverture et la fermeture rapides par une seule personne, la compatibilité avec les bras robotisés, une répartition optimale du poids et des interfaces standardisées afin de minimiser le temps d'intervention dans la chambre chauffée ou la boîte à gants et d'optimiser la dose de rayonnement reçue par le personnel. Les indicateurs de conformité réglementaire couvrent les exemptions relatives à l'absence de substances toxiques et de plomb, la recyclabilité directe, l'homologation du type de conteneur de transport, la contamination des surfaces par simple nettoyage et l'absence totale d'impact sur l'élimination finale, répondant ainsi pleinement aux exigences les plus strictes de l'Agence internationale de l'énergie atomique (AIEA), de l'Administration nationale de la sûreté nucléaire (NNSA) et des services de protection de l'environnement.

Les cinq indicateurs susmentionnés ont été vérifiés par des essais de type, des essais de vieillissement accéléré, des essais combinés de chute et de feu, ainsi qu'un suivi physique à long terme, constituant ainsi un ensemble complet de critères de qualification. Seuls les conteneurs de blindage en alliage de tungstène répondant simultanément à toutes ces normes sont autorisés dans les cellules chaudes de médecine nucléaire, les lignes de production d'isotopes ou les stations de transfert de déchets, garantissant une solution de blindage fiable à vie. La mise en place de ce système marque la transformation complète des

### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

conteneurs de blindage en alliage de tungstène, passant de simples substituts de matériaux à des produits de pointe, fiables et performants, dans le domaine de la radioprotection.

#### 2.2.2.1 Indice de densité du réservoir de protection en alliage de tungstène

L'indicateur de performance le plus crucial et fondamental des conteneurs de blindage en alliage de tungstène détermine directement la densité atomique et le libre parcours moyen du rayonnement par unité d'épaisseur. Il s'agit du paramètre principal de l'efficacité du blindage. Les conteneurs de blindage haut de gamme en alliage de tungstène exigent une densité volumique stable et extrêmement élevée, avec une variation minimale de densité dans toute la paroi du conteneur. Ceci garantit une décroissance exponentielle parfaitement homogène du rayonnement à l'intérieur de la paroi, évitant ainsi les fuites de dose dues à des zones de faible densité localisées.

En ingénierie pratique, les indicateurs de densité sont subdivisés en quatre exigences : le taux d'atteinte de la densité théorique, la densité locale minimale, l'uniformité de la densité et la stabilité de la densité à long terme. Le taux d'atteinte de la densité théorique exige que la densité globale de l'ébauche frittée soit proche d'un rapport très élevé entre la densité moyenne pondérée théorique du tungstène et celle du liant ; toute porosité, inclusion ou particule de tungstène non dissoute est considérée comme un défaut rédhibitoire. La densité locale minimale est vérifiée couche par couche par tomographie aux rayons X ou par transmission gamma afin de garantir l'absence de zones de faible densité, notamment au fond des trous, dans les angles et dans les zones affectées thermiquement par la soudure. L'uniformité de la densité exige que les fluctuations de densité dans l'ensemble du lot soient maîtrisées dans une plage extrêmement étroite afin d'éviter la déviation de la direction de diffusion des rayons X et l'échappement asymétrique du rayonnement secondaire dû aux gradients de densité. La stabilité de la densité à long terme est évaluée par des essais de gonflement sous irradiation accélérée et des essais de vieillissement sous vide à haute température, exigeant une dégradation de la densité quasi nulle pendant la durée de vie nominale.

La densité ayant un impact déterminant sur l'efficacité du blindage, les conteneurs de blindage en alliage de tungstène sont soumis à un système de contrôle rigoureux en boucle fermée, appliqué à l'ensemble du processus de fabrication : réception des matières premières, frittage, pressage isostatique à chaud, usinage et inspection finale. Ce système leur a valu une reconnaissance en tant que référence en matière de contrôle de la densité dans l'industrie. Seuls les conteneurs de blindage répondant pleinement aux normes de densité sont autorisés à être utilisés dans les cellules chaudes de médecine nucléaire et les lignes de production d'isotopes de haute activité.

#### 2.2.2 Indice de dureté du réservoir de protection en alliage de tungstène

Bien que la dureté n'influence pas directement l'atténuation des rayonnements comme la densité, elle joue un rôle irremplaçable dans la fiabilité globale des conteneurs de blindage en alliage de tungstène tout au long de leur cycle de vie. Elle reflète la résistance aux rayures, à l'abrasion, à la piqure, au décollement de surface induit par les rayonnements et la facilité de nettoyage. Les conteneurs de blindage en alliage de tungstène haut de gamme nécessitent une approche systématique de la dureté : « dureté de surface, ténacité interne et durabilité ». La dureté de surface doit être suffisamment élevée pour résister

##### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT



aux nettoyages mécaniques répétés et aux chocs accidentels ; le cœur doit conserver une ténacité adéquate pour éviter la fissuration fragile ; et la dureté globale doit rester pratiquement inchangée après une irradiation et des cycles thermiques de longue durée. L'indice de dureté se divise en quatre aspects : la microdureté de la matrice, la dureté de la couche de renforcement superficielle, l'uniformité de la dureté et la stabilité de la dureté à long terme. La microdureté de la matrice exige une forte adhésion entre les particules de tungstène et l'interface de la phase liante, sans zones de ramollissement, afin d'éviter l'apparition de microfissures dans le réservoir en cas de chute, de vibrations ou de chocs thermiques. La dureté de la couche de renforcement superficielle est obtenue par boruration, nitruration ionique, revêtement de carbone amorphe (DLC) ou projection supersonique de couches nanocristallines. Ces procédés rendent la couche externe beaucoup plus dure que le cœur, formant ainsi une enveloppe protectrice « dure à l'extérieur, tenace à l'intérieur » qui résiste au nettoyage par brosses métalliques et au décapage acide, et qui inhibe la pulvérisation et le décollement superficiels induits par les radiations.

L'uniformité de la dureté exige des fluctuations minimales sur l'ensemble des surfaces intérieure et extérieure du réservoir, au fond des orifices et dans les zones de soudure, afin d'éviter que des points faibles localisés ne deviennent le point de départ de la corrosion et de la contamination. La stabilité de la dureté à long terme est vérifiée par des tests d'irradiation à grand volume et un vieillissement accéléré dans des conditions de température et d'humidité élevées, ce qui implique une dégradation extrêmement faible de la dureté superficielle, l'absence de décollement de la couche de renforcement et l'absence de ramollissement du substrat pendant la durée de vie prévue. La véritable valeur de l'indice de dureté réside dans l'extension de l'« efficacité de blindage » d'une simple atténuation des rayonnements à un cycle de vie complet et écologique, caractérisé par une « décontamination répétée et l'absence de pollution secondaire ». C'est précisément grâce à sa dureté de surface élevée et à son facteur de décontamination important que les conteneurs de blindage en alliage de tungstène retrouvent leur état propre d'origine après des dizaines, voire des centaines d'utilisations intensives. Ils éliminent ainsi définitivement le problème des conteneurs en plomb qui « s'encrassent à l'usage et finissent par devenir inutilisables », et constituent une plateforme de blindage véritablement durable.

### 2.2.3 Indice de résistance à la traction du réservoir de protection en alliage de tungstène

base des réservoirs blindés en alliage de tungstène assure le maintien de leur intégrité structurelle et de la géométrie de leur blindage tout au long de leur cycle de vie. Elle doit non seulement satisfaire aux exigences de charge statique, d'empilage et de contrainte thermique en conditions normales d'utilisation, mais aussi garantir que le corps du réservoir ne se fissure pas, ne se déforme pas et ne perde pas sa circularité en cas d'accidents extrêmes tels que des chutes, des séismes, des incendies et des chocs liés au transport. Ainsi, l'épaisseur minimale du blindage est maintenue et la surface d'étanchéité ne se déforme pas.

haut de gamme en alliage de tungstène sont intégrés à un système complet garantissant une résistance élevée à température ambiante, l'absence de ramollissement à haute température, l'absence de fragilisation sous irradiation et une excellente résistance à la fatigue. La résistance à la traction à température ambiante doit largement dépasser celle de l'acier de construction conventionnel afin de résister aux contraintes de traction soudaines lors du levage, du transport et de l'installation. La résistance

#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT



à la traction à haute température doit conserver une résistance résiduelle suffisante, même aux températures élevées fréquemment rencontrées dans les chambres chaudes de médecine nucléaire ou lors d'accidents d'incendie, afin d'éviter un affaissement par fluage similaire à celui des conteneurs en plomb. La diminution de la résistance à la traction après irradiation doit être quasi nulle afin de prévenir la fragilisation par irradiation et la perte de résistance causées par des débits d'injection élevés et prolongés. La résistance à la fatigue sous chargement cyclique doit garantir l'absence de microfissures après des dizaines de milliers de cycles d'ouverture, de cycles thermiques et de vibrations.

Pour atteindre les objectifs susmentionnés, les conteneurs de blindage en alliage de tungstène utilisent généralement des structures renforcées par des fibres ayant subi une transformation plastique secondaire avec une forte déformation, à partir de systèmes tungstène-nickel-fer ou tungstène-nickel-cuivre. Il en résulte des particules de tungstène fibreuses, allongées et hautement orientées, avec une phase liante uniformément répartie le long des interstices des fibres, formant une structure de renforcement composite naturelle de type « béton armé ». Cette structure présente une capacité portante et une résistance à la propagation des fissures en traction extrêmement élevées ; même les défauts mineurs peuvent être rapidement passivés sans propagation instable. L'évaluation des performances réelles comprend des essais de traction à température ambiante, des essais de traction à haute température spécifiés, des essais de traction après irradiation, ainsi qu'une série complète d'essais de fatigue à grand et petit nombre de cycles ; tous ces essais sont indispensables. Seuls les lots qui réussissent tous les tests sont autorisés à être utilisés dans les grands conteneurs de transfert de déchets, les conteneurs de transport et les conteneurs à chambre chaude fixes, garantissant ainsi que la géométrie de blindage et la fonction de confinement ne défaillassent jamais dans les environnements de couplage mécanique-thermique-irradiation les plus sévères.

#### 2.2.4 Indicateurs de performance d'étanchéité des réservoirs blindés en alliage de tungstène

L'étanchéité est l'un des indicateurs fonctionnels les plus critiques qui distingue les conteneurs blindés en alliage de tungstène des conteneurs structurels ordinaires. Elle détermine directement si des poussières radioactives, des aérosols et des radionucléides volatils s'infiltreront dans l'environnement d'exploitation en quantités inacceptables. Elle constitue le dernier rempart pour atteindre l'objectif réglementaire de « zéro fuite et d'exposition minimale du personnel ».

tungstène ne sont classés en trois niveaux : étanchéité statique, étanchéité dynamique et étanchéité d'urgence. L'étanchéité statique exige que le taux de détection de fuite par spectrométrie de masse à l'hélium reste constamment à un niveau extrêmement bas, de la température ambiante à la température maximale de service et à la limite supérieure de la dose d'irradiation cumulée, éliminant ainsi toute fuite au niveau moléculaire. L'étanchéité dynamique exige qu'après des dizaines de milliers de cycles d'ouverture et de fermeture, de cycles thermiques et de vibrations mineures, la surface d'étanchéité conserve sa précision d'ajustement initiale et sa capacité de récupération élastique, sans déformation ni desserrage permanent. L'étanchéité d'urgence exige que, dans des conditions de chute de hauteur spécifiée, d'incendie à haute température, d'impact externe et même de déformation plastique partielle, la structure composite labyrinthe + anneau d'étanchéité conserve une compression suffisante pour garantir le maintien du confinement.

#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

En termes de mise en œuvre, les conteneurs de blindage en alliage de tungstène adoptent généralement une conception à « triple protection » :

- La première étape consiste en une maturation de haute précision d'une surface labyrinthique étagée en métal dur sur métal dur, qui utilise le coefficient de dilatation thermique extrêmement faible et la rigidité élevée de l'alliage de tungstène pour obtenir une liaison au niveau du micron.
- La deuxième couche est un anneau d'étanchéité en forme de C/Ω en caoutchouc fluoré, en caoutchouc silicone ou en métal, résistant aux radiations, aux hautes températures et aux acides et bases forts, assurant une compensation élastique et une barrière au niveau moléculaire.
- La pression est assurée par le poids du couvercle lui-même, ainsi que par un système de fermeture rapide ou un système à filetage multiple, garantissant qu'il ne se desserrera pas sur une longue période.

Parallèlement, les surfaces d'étanchéité sont généralement traitées par polissage miroir et implantation ionique ou revêtement DLC, ce qui leur confère une dureté de surface extrêmement élevée et une forte inertie chimique, les rendant ainsi résistantes aux rayures et extrêmement lentes au vieillissement. Avant sa sortie d'usine, chaque conteneur est soumis à un test d'étanchéité rigoureux comprenant des essais sous vide, de pressurisation et de spectrométrie de masse à l'hélium, ainsi qu'à plus de dix ans de tests de vieillissement thermique accéléré et d'irradiation afin de vérifier la durée de vie des joints. C'est ce système quasi obsessionnel d'indicateurs de performance d'étanchéité qui a permis aux conteneurs blindés en alliage de tungstène d'atteindre un niveau d'étanchéité « zéro fuite » dans les cellules chaudes de médecine nucléaire et les installations de stockage temporaire de déchets de haute activité les plus exigeantes au monde, faisant d'eux la référence absolue dans le domaine des conteneurs blindés de confinement.

### 2.2.5 Indicateurs de résistance à la corrosion des réservoirs blindés en alliage de tungstène

La résistance à la corrosion est la garantie fondamentale permettant aux réservoirs de blindage en alliage de tungstène d'assurer un « nettoyage répété, un fonctionnement sans entretien à long terme et une absence totale de pollution secondaire ». Elle détermine directement si le réservoir peut maintenir l'intégrité de sa surface et son authenticité géométrique lors d'une immersion prolongée dans des détergents acides, des solutions de nettoyage alcalines, des désinfectants chlorés, de l'air chaud et humide, ou même des déchets radioactifs liquides, empêchant ainsi la formation de piqûres, de corrosion intergranulaire ou de dissolution uniforme qui deviendraient des voies de fuite radioactive et des points d'attache permanents pour les poussières radioactives.

La résistance à la corrosion des réservoirs blindés haut de gamme en alliage de tungstène repose sur un système à double voie : un système primaire non magnétique résistant à la corrosion en tungstène-nickel-cuivre et un système secondaire en tungstène-nickel-fer avec revêtement amélioré. Le système tungstène-nickel-cuivre, grâce au film autopassivant dense formé par le cuivre dans la phase liante, présente une résistance à la corrosion extrêmement élevée, proche de l'inertie chimique, sur une large gamme de pH (1 à 14), dans des détergents fortement oxydants et en présence d'éclaboussures d'eau de mer. La surface ne présente quasiment aucune trace de corrosion visible, affiche un potentiel de piqûration extrêmement

#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

élevé et reste parfaitement lisse, même après une immersion prolongée. Bien que le système tungstène-nickel-fer soit plus résistant, il présente une légère tendance à la corrosion intergranulaire en milieux acides et chlorés. Par conséquent, il doit être complété par un nickelage chimique, un dépôt PVD de CrN ou des revêtements de nettoyage composites multicouches pour atteindre une résistance à la corrosion de surface égale ou supérieure à celle du tungstène-nickel-cuivre.

Les tests spécifiques de résistance à la corrosion comprennent le vieillissement au brouillard salin, l'immersion dans des acides et des bases forts, des lavages répétés aux détergents, les courbes de polarisation électrochimique, les tests d'induction de corrosion par piqûres et la vérification du contact à long terme avec un liquide de déchets radioactifs réel. Les exigences sont les suivantes : même dans les conditions de décontamination et de stockage de liquides de déchets les plus sévères, la profondeur de corrosion superficielle doit être quasi nulle, la perte de masse négligeable, le facteur de décontamination constamment supérieur à des niveaux extrêmement élevés et la rugosité de surface ne doit pas augmenter. Ce sont précisément ces indicateurs de résistance à la corrosion, extrêmement rigoureux, qui permettent de nettoyer facilement le réservoir blindé en alliage de tungstène et de lui redonner son état d'origine, même après des décennies de fonctionnement à haute activité.

#### 2.2.6 Efficacité de blindage des boîtiers de blindage en alliage de tungstène

Les performances des boîtiers de protection en alliage de tungstène ne sont plus évaluées selon le concept d'une simple couche de demi-atténuation ou de dixième atténuation. Le débit de dose en tout point de la surface extérieure, dans les conditions les plus défavorables (source la plus élevée, durée de vie maximale et environnement le plus extrême), est le seul critère pris en compte. Ce système offre une protection complète contre les rayonnements gamma, X, neutrons et tous les rayonnements secondaires, ainsi qu'une longue durée de vie.

L'indice d'efficacité de blindage réel est composé des cinq sous-indicateurs suivants :

- Débit de dose maximal sur la surface extérieure : doit être constamment inférieur à une fraction de la limite réglementaire à l'activité maximale du terme source conçu et à la distance source-conteneur la plus courte, et il ne doit y avoir aucun point chaud dans aucune direction ;
- Distribution de l'angle de fuite des rayonnements : nécessite une dose uniforme dans toutes les directions, sans fuite directionnelle ni « effet cheminée » ;
- Niveau de contrôle du rayonnement secondaire : le rayonnement de freinage, les photons d'annihilation, les rayons X caractéristiques et les rayons gamma capturés doivent tous être absorbés localement par la paroi du réservoir, et aucun pic secondaire détectable ne doit apparaître sur la surface extérieure ;
- Stabilité de l'efficacité de blindage à long terme : Au cours de la durée de vie prévue, après une irradiation par flux maximal cumulé, un vieillissement à haute température et à haute humidité, et une décontamination répétée, l'efficacité de blindage doit diminuer jusqu'à presque zéro.
- Intégrité du blindage dans le pire des cas : après les tests combinés de chute, d'incendie, d'empilement et de tremblement de terre spécifiés, le débit de dose sur la surface extérieure ne doit toujours pas dépasser la norme.

#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

dès la phase de conception, une simulation Monte Carlo du spectre complet et une analyse de couplage multiphysique afin de prédire avec précision la distribution de dose pour les épaisseurs de paroi les plus faibles, les géométries les plus complexes et les combinaisons de sources les plus défavorables. Lors de la phase de fabrication, l'imagerie gamma, l'étalonnage par irradiation avec une source réelle de cobalt-60 et la vérification des sources réelles en chambre chaude sont utilisés pour garantir que l'efficacité de blindage réelle de chaque conteneur en sortie d'usine est parfaitement conforme au calcul théorique.

Grâce à des exigences d'efficacité de blindage extrêmement rigoureuses, les conteneurs de blindage en alliage de tungstène maintiennent un débit de dose externe stable, à un niveau comparable à celui du rayonnement de fond, pendant une longue période, même dans les centres de médecine nucléaire les plus exigeants, les usines d'isotopes à haute activité et les installations de stockage de déchets les plus strictement réglementées. Ils atteignent ainsi pleinement l'objectif ultime de protection, à savoir « confiner la source radioactive dans le conteneur et garantir la sécurité du personnel et de l'environnement », ce qui en fait la référence incontestée en matière de blindage radiologique moderne.

### 2.2.7 Indicateurs de ductilité des boîtiers blindés en alliage de tungstène

La ductilité est essentielle pour que les boîtes blindées en alliage de tungstène conservent leur intégrité et évitent la rupture fragile dans des conditions extrêmes et imprévues. Elle détermine si le corps de la boîte se brisera instantanément comme de la céramique en cas de chute, de renversement dû à un séisme, de chocs liés au transport ou même de surcharges localisées, ou s'il subira une déformation plastique contrôlée comme un acier de haute qualité pour absorber l'énergie et éviter une fissuration catastrophique. L'indice de ductilité des boîtes blindées en alliage de tungstène a depuis longtemps dépassé le préjugé tenace selon lequel « une résistance élevée entraîne inévitablement une fragilité » des métaux réfractaires traditionnels, atteignant ainsi un excellent compromis entre résistance et ténacité.

Les conteneurs de blindage en alliage de tungstène de haute qualité nécessitent un allongement à température ambiante suffisamment élevé. Même pour les nuances à parois épaisses et à faible teneur en liant, les éprouvettes de traction doivent présenter un striction significative plutôt qu'une rupture affleurante ; les essais de flexion doivent permettre d'obtenir des angles quasi droits sans fissuration ; et l'énergie de résilience Charpy doit être nettement supérieure à celle du tungstène pur et de la plupart des alliages haute température. La ductilité à haute température est tout aussi cruciale. Aux températures courantes des cellules chaudes de médecine nucléaire, et même aux températures d'accident d'incendie, l'allongement et la résilience ne peuvent diminuer que lentement, et une chute brutale dans la zone de fragilité est absolument inacceptable. Le maintien de la ductilité après irradiation est primordial. Après le volume d'injection cumulé sur la durée de vie nominale, l'atténuation de l'allongement et de l'énergie de résilience doit être négligeable afin d'éliminer le risque de fissuration différée due à la fragilisation induite par l'irradiation.

La clé pour atteindre cet objectif réside dans la structure composite naturelle formée par les fines particules fibreuses de tungstène et la phase liante uniformément dispersée : les particules de tungstène présentent une résistance élevée, la phase liante fournit un pont solide et, une fois qu'une fissure se forme,

#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

elle sera passivée, déviée et pontée à plusieurs reprises par la phase liante, finissant par épuiser l'énergie de propagation.

### 2.2.8 Indicateurs de résistance aux hautes températures des boîtiers blindés en alliage de tungstène

La résistance aux hautes températures est la garantie fondamentale que les conteneurs blindés en alliage de tungstène conservent l'épaisseur de leur blindage, leur étanchéité et leur stabilité structurelle en cas d'incendie, dans des enceintes à haute température ou sous l'effet d'une charge thermique prolongée. Elle permet aux conteneurs blindés en alliage de tungstène de s'affranchir des défauts rédhibitoires des conteneurs en plomb qui fondent et coulent sous l'effet du feu, et des conteneurs en béton qui se déshydratent et se fissurent à haute température. L'alliage de tungstène est ainsi le seul conteneur blindé capable de maintenir ses propriétés protectrices même à des températures extrêmement élevées.

Les conteneurs de blindage en alliage de tungstène haut de gamme doivent conserver une résistance, une dureté, une ductilité et une précision dimensionnelle quasi constantes dans le temps, même sous les températures élevées et soutenues typiques des chambres chaudes des cyclotrons de médecine nucléaire. En cas d'incendie de courte durée, une légère oxydation peut se produire en surface, mais la structure interne et la géométrie restent intactes, l'épaisseur de la paroi de blindage ne diminue pas, la surface d'étanchéité ne se déforme pas et le mécanisme de verrouillage fonctionne normalement. Les indicateurs clés comprennent la résistance instantanée à haute température, un fluage à haute température quasi nul, la résistance à la fissuration par choc thermique et le maintien de l'efficacité du blindage après oxydation à haute température.

Les alliages de tungstène possèdent intrinsèquement des températures de recristallisation extrêmement élevées et des coefficients de dilatation thermique extrêmement faibles. Associés à des revêtements de surface par diffusion de  $\text{MoSi}_2$  ou d' $\text{Al}_2\text{O}_3$ , ou à un nickelage chimique avec une couche de passivation haute température, ils ne forment qu'un film d'oxyde mince et dense lors de brèves explosions de flammes à des milliers de degrés Celsius, tandis que le cœur conserve ses propriétés mécaniques et sa densité initiales. Sous des températures élevées prolongées, les fines particules de tungstène et les phases liantes dispersées ancrent efficacement les joints de grains, empêchant la recristallisation et le fluage, et garantissant ainsi la précision dimensionnelle du conteneur et la planéité de la surface d'étanchéité. Cette extraordinaire résistance aux hautes températures – absence de ramollissement au contact du feu, de dilatation sous l'effet de la chaleur et de dureté après combustion – permet aux conteneurs blindés en alliage de tungstène de gagner un temps précieux pour l'intervention d'urgence, même dans les scénarios d'incendie les plus terrifiants, devenant ainsi la protection ultime contre les incendies de matières radioactives.

### 2.3 Fiche de données de sécurité (FDS) de l'emballage blindé en alliage de tungstène de CTIA GROUP LTD

La fiche de données de sécurité (FDS) des conteneurs blindés en alliage de tungstène fabriqués par CTIA GROUP LTD Co., Ltd. est un document normalisé relatif à la sécurité chimique, conçu spécifiquement pour les conteneurs blindés haute densité à base de tungstène de l'entreprise. Elle vise à fournir une

#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT



identification complète et fiable des risques, des recommandations de protection et des solutions d'intervention d'urgence tout au long du cycle de vie, depuis l'approvisionnement en matières premières, la fabrication, le transport et le stockage jusqu'à l'utilisation sur site, la maintenance, la décontamination et l'élimination finale. En tant que fournisseur mondial de premier plan de matériaux en tungstène, la FDS de CTIA GROUP LTD est strictement conforme aux exigences du Système général harmonisé de classification et d'étiquetage des produits chimiques (SGH) des Nations Unies et à la norme nationale chinoise GB/T 16483. Elle couvre des modules essentiels tels que les informations de base sur la substance, la classification des dangers potentiels, les premiers secours, la gestion des risques d'incendie et d'explosion, la gestion des déversements, le contrôle de l'exposition opérationnelle et les équipements de protection individuelle, les propriétés physico-chimiques, la stabilité et la réactivité du matériau, les informations toxicologiques, les impacts écotoxicologiques, les directives d'élimination, les informations relatives au transport et la déclaration de responsabilité réglementaire.

Le module d'information de base clarifie d'abord l'identité chimique de la boîte de blindage en alliage de tungstène : elle est principalement composée de tungstène (CAS 7440-33-7), complétée par du nickel (CAS 7440-02-0), du fer (CAS 7439-89-6) ou du cuivre (CAS 7440-50-8), et se présente sous la forme d'un composite métallique haute densité avec un aspect typique de lustre métallique gris argenté.

La classification des dangers potentiels se concentre sur les risques d'exposition professionnelle. Les conteneurs de protection en alliage de tungstène sont des produits métalliques inertes et ne présentent aucune toxicité aiguë, cancérogénicité ou toxicité pour la reproduction lors de leur utilisation normale pour le confinement et la protection. L'évaluation globale des risques classe ces conteneurs comme « solides à faible risque ».

La section relative aux propriétés physico-chimiques décrit le conteneur de protection en alliage de tungstène comme un composite métallique à point de fusion élevé, résistant aux hautes températures et insoluble dans l'eau. La section concernant la stabilité du matériau indique que le conteneur est très stable à température ambiante, mais qu'une oxydation superficielle peut se produire à haute température. Il est recommandé de le stocker dans un endroit sec et bien ventilé et d'éviter tout contact direct avec les acides et les bases forts. Les informations relatives au transport classent les conteneurs blindés en alliage de tungstène comme marchandises non dangereuses et autorisent leur transport comme des produits métalliques ordinaires. Les informations réglementaires mentionnent les déclarations de conformité aux réglementations REACH et RoHS, ainsi qu'à la norme chinoise GB 30000.



CTIA GROUP LTD Boîtier de blindage en alliage de tungstène

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

## CTIA GROUP LTD

### High-Density Tungsten Alloy Customization Service

CTIA GROUP LTD, a customization expert in high-density tungsten alloy design and production with 30 years of experience.

**Core advantages:** 30 years of experience: deeply familiar with tungsten alloy production, mature technology.

**Precision customization:** support high density (17-19 g/cm<sup>3</sup>), special performance, complex structure, super large and very small parts design and production.

**Quality cost:** optimized design, optimal mold and processing mode, excellent cost performance.

**Advanced capabilities:** advanced production equipment, RMI, ISO 9001 certification.

#### 100,000+ customers

Widely involved, covering aerospace, military industry, medical equipment, energy industry, sports and entertainment and other fields.

#### Service commitment

1 billion+ visits to the official website, 1 million+ web pages, 100,000+ customers, 0 complaints in 30 years!

Contact us

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

Tel: +86 592 5129696

Official website: [www.tungsten-alloy.com](http://www.tungsten-alloy.com)



#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

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

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

## Chapitre 3 Logique de conception et classification des types de boîtiers de blindage en alliage de tungstène

### 3.1 Composition structurale du blindage en alliage de tungstène

Les conteneurs blindés en alliage de tungstène suivent un principe d'ingénierie système cinq-en-un : « enceinte, blindage, fonctionnement, décontamination et transport ». Chaque composant est étroitement lié aux autres en termes de fonction, de mécanique, de thermodynamique, d'irradiation et de réglementation, formant ainsi un ensemble hautement redondant, sûr, vérifiable et à durée de vie prévisible. Sa conception surpasse largement le simple empilement traditionnel de « boîtes métalliques et de revêtements en plomb », en exploitant pleinement les avantages des alliages de tungstène : haute densité, haute résistance, non-toxicité et longue durée de vie. Cette approche permet une couverture complète, des manchons de protection pour micro-seringues aux conteneurs de transfert de déchets de plusieurs tonnes.

Le corps principal du réservoir constitue l'élément porteur et de blindage essentiel de l'ensemble de la structure. Il est généralement constitué d'un seul lingot fritté quasi-fini ou d'un grand anneau forgé soudé par sections, garantissant ainsi que l'épaisseur minimale des parois dans toutes les directions réponde aux exigences d'atténuation pour les rayonnements les plus nocifs. La cavité interne est conçue avec précision en fonction de la forme de la source de rayonnement, formant une cavité cylindrique, rectangulaire, polygonale ou de forme irrégulière complexe. Toutes les surfaces internes sont polies miroir afin d'éliminer complètement les zones mortes et les points de contamination. La surface externe est équipée d'anneaux de levage intégrés, de fentes pour chariot élévateur ou d'interfaces pour palettes normalisées, selon les besoins de levage. Elle comporte également des orifices réservés à la surveillance du débit de dose, des vannes d'équilibrage de la ventilation et des interfaces pour la pulvérisation de décontamination, transformant ainsi le réservoir d'un simple élément de confinement en une plateforme intégrée dotée de fonctions de surveillance et d'exploitation.

Le couvercle et le système de fermeture constituent le dernier rempart contre les fuites et sont les pièces les plus fréquemment manipulées au quotidien. Les modèles haut de gamme utilisent généralement des couvercles à labyrinthe étagés intégrés, assurant un ajustement parfait entre le couvercle et l'ouverture grâce à un usinage CNC de haute précision. Associés à des joints toriques en fluoroélastomère résistant aux radiations, des joints toriques métalliques ou des joints composites à double sécurité, ces couvercles garantissent une étanchéité statique et dynamique parfaite, même après des dizaines de milliers de cycles d'ouverture et de fermeture. Les mécanismes de verrouillage font souvent appel à des systèmes de verrouillage rapide, des bagues de verrouillage rotatives ou des systèmes d'ouverture rapide hydrauliques, permettant à une seule personne d'ouvrir et de fermer le récipient en quelques secondes depuis la boîte à gants. De plus, une ouverture manuelle reste possible après un incendie ou une exposition à une température élevée, offrant ainsi un temps précieux pour une intervention d'urgence.

Les caractéristiques conviviales qui distinguent le conteneur blindé en alliage de tungstène des conteneurs en plomb traditionnels sont remarquables. La fenêtre d'observation intégrée en verre au plomb est dotée d'un cadre en alliage de tungstène et d'une conception de blindage multicouche à gradient,

#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

permettant à l'opérateur d'observer directement le déplacement de la source sans compromettre la continuité du blindage. L'orifice de contrôle du débit de dose, la soupape de purge, le canal de la tige de commande de la source, ainsi que l'entrée et la sortie des effluents liquides adoptent une structure labyrinthique imbriquée en alliage de tungstène afin d'éviter toute fuite directe dans le sens de l'ouverture.

La couche fonctionnelle de surface garantit la résistance à la corrosion et facilite le nettoyage. Le nickelage chimique, les revêtements de nettoyage résistants aux radiations, les revêtements antioxydants haute température ou les systèmes multicouches composites assurent la propreté et l'aspect neuf de la surface du réservoir, même après des lavages répétés à l'acide, à la base, à la vapeur et même avec des détergents oxydants puissants, éliminant ainsi toute piquûre et toute contamination permanente. Le fond et les parois latérales sont souvent équipés de revêtements sacrificiels remplaçables ou de revêtements anticorrosion internes en acier inoxydable, prolongeant ainsi la durée de vie du réservoir de stockage de liquides usés.

L'interface de levage et de transport intègre harmonieusement la sécurité structurelle à la logistique. Des anneaux de levage forgés intégrés, des plaques de protection contre les chocs latéraux, des palettes inférieures absorbant les chocs et des verrous de conteneur standardisés permettent de lever avec précision le conteneur blindé par des ponts roulants et de maintenir son confinement et son intégrité de blindage tout au long du transport routier, ferroviaire et maritime.

Tous ces composants ont été optimisés dès le départ grâce à une simulation de couplage multiphysique (transport de rayonnement, thermodynamique, mécanique et vieillissement) et ont subi une série complète de tests de vérification lors d'essais de type, incluant des essais de chute, d'empilement, d'incendie, d'immersion et de vieillissement sous irradiation. Ce n'est que lorsque tous les composants fonctionnent de concert pour répondre aux normes les plus rigoureuses que le conteneur de blindage en alliage de tungstène peut véritablement être considéré comme le vecteur ultime de la radioprotection moderne, caractérisé par un confinement fiable, une efficacité de blindage élevée, une utilisation aisée et une durée de vie extrêmement longue. Il ne s'agit plus d'un simple conteneur métallique, mais d'une œuvre d'art industrielle qui intègre parfaitement la science des matériaux, la fabrication de précision, la physique des rayonnements et l'ingénierie des systèmes.

### **3.1.1 Structure de blindage principale du boîtier de blindage en alliage de tungstène (corps du boîtier, couvercle du boîtier)**

Le corps et le couvercle de la boîte constituent ensemble la structure de blindage principale de la boîte blindée en alliage de tungstène. Cette structure, véritable squelette, détermine la continuité du blindage, l'épaisseur minimale des parois et la précision géométrique. Généralement usinés à partir d'ébauches d'alliage de tungstène haute densité issues du même lot et de la même nuance, ces éléments garantissent une parfaite homogénéité des propriétés du matériau et de l'efficacité du blindage, évitant ainsi les zones de faiblesse au niveau des joints, souvent dues aux différences de matériaux entre le couvercle et le corps des boîtes en plomb traditionnelles.

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



Le corps principal de la boîte est obtenu par un procédé de formage quasi-fini, combiné à un usinage de précision des trous borgnes profonds. Tout d'abord, une ébauche sans soudure et haute densité est obtenue par pressage isostatique à froid ou à chaud de très grande dimension. Ensuite, la cavité intérieure, présentant un rapport profondeur/diamètre extrêmement élevé, est réalisée en une seule étape par perçage profond, rodage multi-étapes et électrolyse assistée par ultrasons. Ce procédé garantit que l'épaisseur minimale des parois, en tout point du fond du trou et sur les parois latérales, répond aux exigences d'atténuation du rayonnement le plus défavorable. Le contour extérieur est conçu comme un cylindre, une colonne carrée ou une forme irrégulière à amincissement progressif, selon l'utilisation prévue, afin de maximiser le volume interne utile et d'obtenir une répartition optimale du centre de gravité lors de la manutention et du transport. L'ouverture de la boîte est formée par rectification CNC de haute précision, créant une surface labyrinthique étagée à plusieurs niveaux. La planéité et la circularité sont contrôlées au micron près, assurant ainsi une étanchéité parfaite pour la pose ultérieure du couvercle.

Le couvercle est l'élément le plus actif et précis de la structure, déterminant directement l'efficacité d'ouverture et de fermeture quotidienne ainsi que la fiabilité de l'étanchéité à long terme. Les modèles haut de gamme utilisent généralement une structure auto-centrante intégrée : le diamètre extérieur du couvercle est légèrement inférieur au diamètre intérieur de l'ouverture de la boîte, s'alignant automatiquement grâce à la gravité et à des nervures de guidage. La surface inférieure du couvercle est usinée avec un labyrinthe à plusieurs niveaux épousant parfaitement l'ouverture de la boîte, formant une bande de protection composite composée de plusieurs contacts durs métal-métal et de contacts souples avec un joint élastique après la mise en place. La partie supérieure du couvercle comporte un anneau de levage forgé intégré ou une interface de serrage rapide, facilitant la préhension par robot et garantissant le maintien de l'opérabilité même après une exposition à de hautes températures dues à un incendie. Certains grands conteneurs à déchets utilisent même une conception à double couvercle : le couvercle intérieur est un couvercle soudé en alliage de tungstène, étanche et à usage unique, tandis que le couvercle extérieur est un couvercle à ouverture rapide réutilisable, offrant un équilibre optimal entre confinement et maniabilité. La zone de jonction entre le corps et le couvercle du réservoir est l'élément le plus souvent négligé, mais pourtant le plus critique, de l'ensemble de la structure de blindage. Les réservoirs de blindage en alliage de tungstène bénéficient d'une liaison de qualité métallurgique grâce au soudage par anneau forgé intégré et au soudage par faisceau d'électrons ou au brasage sous vide. La microstructure et les propriétés de la zone affectée thermiquement par la soudure sont intégralement restaurées au niveau du matériau de base, éliminant ainsi tout risque de fuite lié aux raccords traversants traditionnels ou aux brides en plomb. Au final, le corps et le couvercle du réservoir forment une enveloppe de blindage complète en alliage de tungstène, sans point faible ni fuite directionnelle, garantissant que le rayonnement ne puisse que percuter de manière répétée l'intérieur du matériau haute densité jusqu'à épuisement de son énergie, sans pouvoir s'échapper.

### 3.1.2 Structures fonctionnelles auxiliaires (revêtement, connecteurs) des réservoirs de protection en alliage de tungstène

Bien que les structures fonctionnelles auxiliaires n'assurent pas directement la fonction de blindage principale, elles jouent un rôle irremplaçable en matière de résistance à la corrosion, de facilité de nettoyage, de simplicité d'utilisation et de durabilité. À l'instar des ressorts et des rondelles dans les

#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT



instruments de précision, elles peuvent paraître insignifiantes, mais elles déterminent si l'ensemble du blindage peut véritablement atteindre l'objectif ultime : « une utilisation à vie, un simple coup de chiffon pour lui redonner son aspect neuf ».

Le système de revêtement constitue une double couche de protection contre la contamination chimique et radioactive. Selon l'application, il se divise en trois catégories : les revêtements sacrificiels remplaçables, les revêtements anticorrosion fixes et les revêtements composites fonctionnels. Les revêtements sacrificiels remplaçables sont généralement constitués de fines feuilles d'acier inoxydable à faible activation ou d'alliage de titane, fixées au fond et aux parois latérales de la cavité interne par des pinces ou un système magnétique. Conçus spécifiquement pour recueillir les déchets liquides ou les résidus radioactifs pulvérulents, ils sont entièrement retirés et remplacés une fois saturés, garantissant ainsi que le corps en alliage de tungstène n'entre jamais en contact direct avec la source de contamination. Les revêtements anticorrosion fixes utilisent des procédés de dépôt physique en phase vapeur (PVD), de projection thermique ou de diffusion pour former une couche de CrN. Un film de TiN (carbone de type diamant) de plusieurs dizaines de micromètres d'épaisseur est déposé sur la surface de l'alliage de tungstène, le protégeant ainsi des acides et bases forts, ainsi que des détergents oxydants. Les revêtements composites fonctionnels sont couramment utilisés dans les réservoirs soumis à des exigences élevées en matière de blindage neutronique. Ils intègrent des couches de polyéthylène contenant du bore ou de lithium riche en hydrogène sur la surface interne de l'alliage de tungstène, absorbant les neutrons thermiques et supprimant la capture des rayons gamma, pour une protection combinée optimale contre les rayons gamma et les neutrons.

Les connecteurs et les aides à la manipulation transforment le conteneur de blindage d'un système statique en un terminal intelligent et interactif. Les brides à verrouillage rapide, fabriquées en alliage de tungstène ou de titane haute résistance, et dotées d'un système d'autoblocage par coin, permettent de serrer fermement le couvercle d'une tonne en quelques secondes. Le canal du levier de commande de la source utilise un manchon en alliage de tungstène à plusieurs étages et un joint à soufflet, permettant au bras robotisé ou à la télécommande de déplacer la source radioactive au cœur de la cavité tout en garantissant une étanchéité parfaite. La soupape d'équilibrage de pression de purge est équipée d'un élément filtrant intégré en alliage de tungstène et d'une membrane résistante aux radiations, compensant automatiquement les légères variations de pression dues aux changements de température à l'intérieur du conteneur et empêchant toute fuite d'aérosols radioactifs. La vanne de vidange des effluents liquides par le bas utilise une conception à double vanne et un siège de vanne en alliage de tungstène afin de garantir que le processus de vidange ne compromette pas le confinement global.

Toutes les structures fonctionnelles auxiliaires sont conçues selon les principes « démontable, remplaçable, inspectable et traçable ». Chaque plaque de revêtement, chaque joint d'étanchéité et chaque levier de commande possède un code d'identification unique et un historique de sa durée de vie, facilitant ainsi la maintenance rapide et les audits de conformité par les utilisateurs hors de l'environnement thermique. Associées à la structure de blindage principale, elles forment un système hautement modulaire et évolutif, garantissant que le réservoir de blindage en alliage de tungstène offre non seulement des performances optimales dès sa fabrication, mais aussi une fiabilité durable après vingt ou trente ans de

#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

service grâce au remplacement des composants auxiliaires. Ceci incarne pleinement le concept d'« investissement unique pour une tranquillité d'esprit à vie ».

### 3.1.3 Principe de blindage de la structure du boîtier de blindage en alliage de tungstène

tungstène ne réside pas dans l'épaisseur ou la dureté d'un seul composant, mais dans la façon dont toutes les structures — y compris le corps du conteneur, le couvercle, le labyrinthe, les joints, le revêtement, les fenêtres d'observation et les interfaces fonctionnelles — fonctionnent ensemble comme un orchestre symphonique pour bloquer toutes les voies d'échappement possibles des radiations et éliminer tout type de rayonnement secondaire sur site, atteignant ainsi un état de blindage parfait de « silence complet à l'extérieur du conteneur et de haut niveau de contrôle à l'intérieur ».

Tout d'abord, il y a la synergie géométrique : la cavité profonde du corps du réservoir et le labyrinthe à plusieurs niveaux du couvercle forment au moins trois bandes de blindage métalliques continues, de sorte que les rayons directs provenant de n'importe quelle direction doivent traverser au moins trois fois l'épaisseur de la paroi en alliage de tungstène pour s'échapper ; en même temps, les coins arrondis de la cavité, l'autocentrage du couvercle et la conception à épaississement progressif au fond éliminent tous les angles morts géométriques, de sorte que les photons diffusés ne peuvent que rebondir à plusieurs reprises à l'intérieur de la paroi du réservoir jusqu'à épuisement de leur énergie.

Deuxièmement, il existe une synergie des matériaux : le corps principal utilise des grades à haute teneur en tungstène et à haute densité pour assurer l'atténuation primaire, tandis que des couches locales imbriquées contenant du bore, de l'hydrogène ou du cadmium absorbent précisément les neutrons thermiques, et le revêtement fonctionnel de surface ou le revêtement intérieur est spécifiquement conçu pour traiter les rayons X caractéristiques de basse énergie et les électrons secondaires, réalisant une couverture énergétique complète à large spectre et sans zone aveugle.

Troisièmement, il y a la synergie d'étanchéité : le labyrinthe métallique rigide assure le blocage géométrique et la rigidité structurelle, la bague d'étanchéité élastique assure le blocage au niveau moléculaire, et le système de serrage (à bride ou multifiletage) fournit une force de serrage continue. Ces trois éléments fonctionnent en couches successives pour former un double système de sécurité qui garantit que « même si la bague élastique vieillit, la surface métallique restera étanche ; même si la surface métallique est légèrement déformée, la bague élastique pourra compenser ».

Quatrièmement, synergie fonctionnelle : la fenêtre d'observation en verre au plomb est entièrement entourée d'un cadre étagé en alliage de tungstène, l'orifice de contrôle de dose est équipé d'un bouchon à vis en alliage de tungstène et d'un bouchon labyrinthe, et la vanne d'évacuation des liquides usés est équipée d'un raccordement en série à double vanne et d'un siège de vanne en alliage de tungstène, garantissant ainsi que chaque ouverture possède sa propre capacité de blindage indépendante et ne dépend pas de l'épaisseur de la paroi du corps principal pour la compensation.

Enfin, il y a la synergie en conditions de fonctionnement inattendues : en cas de chute, le corps en alliage de tungstène à haute ductilité absorbe l'énergie de l'impact sans se briser, et le labyrinthe et la surface

#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

d'étanchéité ne se déforment pas grâce à leur dureté élevée ; en cas d'incendie, l'alliage de tungstène à point de fusion élevé et le revêtement anti-oxydation garantissent que le réservoir ne fond pas et ne s'effondre pas, et même si la bague d'étanchéité brûle, le labyrinthe métallique maintient l'étanchéité de base ; après une irradiation prolongée, le matériau ne présente ni gonflement, ni activation, ni fragilisation, ce qui garantit que toutes les synergies restent efficaces pendant des décennies.

C'est cette synergie structurelle interconnectée, redondante et à protection mutuelle qui permet au conteneur de blindage en alliage de tungstène de maintenir constamment son débit de dose en surface externe au niveau du rayonnement de fond, même dans les champs de rayonnement mixtes les plus complexes, les environnements d'exploitation les plus exigeants et lors des cycles de service les plus longs. Il ne s'agit plus d'un simple assemblage de pièces, mais d'une entité de blindage vivante, réactive et auto-protectrice.

### 3.2 Principaux types de boîtiers de protection en alliage de tungstène classés selon les scénarios de protection

Les boîtiers de blindage en alliage de tungstène se sont depuis longtemps affranchis des limitations des produits standardisés. Ils forment désormais une gamme hautement spécialisée et sérialisée de types adaptés aux scénarios de blindage réels. Chaque type est conçu sur mesure pour répondre aux exigences spécifiques des sources, des espaces, des modes de fonctionnement et des réglementations, tout en partageant les mêmes matériaux et la même philosophie de conception.

La gamme de conteneurs pour sources médicales est spécialement conçue pour les centres de médecine nucléaire TEP-TDM, les usines pharmaceutiques utilisant des cyclotrons et les salles de traitement Gamma Knife. Elle se caractérise par sa petite taille, sa légèreté, l'absence d'interférences magnétiques et un système d'ouverture et de fermeture extrêmement rapide. Parmi les produits typiques, on trouve des manchons de protection pour seringues, des conteneurs pour générateurs molybdène-technétium, des conteneurs de transport pour fluor-18 et des conteneurs de stockage pour sources d'iode-125. Ces conteneurs sont généralement fabriqués en alliages tungstène-nickel-cuivre non magnétiques et résistants à la corrosion, avec des gradients d'épaisseur de paroi précis, des couvercles à ouverture rapide et des boutons de manipulation à une main. Leur surface bénéficie d'un revêtement ultra-miroir, permettant un accès direct aux salles d'IRM et aux blocs opératoires stériles.

Notre gamme de cuves à chambre chaude fixes est conçue pour la distribution d'isotopes de haute activité et le traitement de cibles. Elles se caractérisent par des parois épaisses, des cavités profondes, une intégration poussée et un entretien minimal à vie. Leurs capacités courantes varient de quelques dizaines de litres à plusieurs mètres cubes. Fabriquées en alliage tungstène-nickel-fer haute résistance, elles sont moulées d'une seule pièce et intègrent un mécanisme de déplacement automatique de la source, un revêtement sacrificiel remplaçable, une large fenêtre d'observation en verre au plomb et de multiples interfaces pour bras robotisés. Elles peuvent fonctionner en continu pendant plus de vingt ans sans qu'il soit nécessaire de démonter la chambre chaude.

#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

Cette gamme de conteneurs de transport est conçue en stricte conformité avec les normes de type A et B de l'Agence internationale de l'énergie atomique (AIEA). Résistante aux chutes, au feu et à l'immersion, elle est également adaptée à une utilisation mondiale. Son extérieur est conforme aux normes ISO et comprend des équerres de fixation, des loquets et des bases antichoc. Sa structure interne utilise un système multicouche d'emboîtement et de rembourrage, avec un revêtement résistant au brouillard salin. Capable de résister à une chute de neuf mètres et à une flamme de 800 °C pendant 30 minutes sans fuite, elle est le seul conteneur homologué pour le transport transnational et intercontinental de matières et de déchets hautement radioactifs.

Notre gamme de réservoirs de transfert et de stockage temporaire de déchets est conçue pour les installations d'irradiation mises hors service, la collecte et le stockage centralisés des déchets, ainsi que le stockage temporaire avant enfouissement géologique. Elle se caractérise par une très grande capacité, une durée de vie exceptionnelle et une redondance maximale. Ces réservoirs sont généralement constitués d'une structure à double, voire triple couvercle, avec un réservoir intérieur soudé de façon permanente, un réservoir intermédiaire à ouverture rapide et un réservoir extérieur antivol. Dotés de multiples interfaces de surveillance et de capteurs d'état lisibles à distance, ils permettent de stocker les déchets en toute sécurité pendant des décennies dans des entrepôts automatisés, sans aucun entretien.

La gamme de conteneurs d'irradiation pour la détection de défauts industriels et la recherche scientifique privilégie la collimation directionnelle et le fenêtrage local. Elle comprend notamment des conteneurs pour la détection de défauts au cobalt-60 et à l'iridium-192, ainsi que des conteneurs pour les canaux d'irradiation des réacteurs. Ces conteneurs utilisent une fenêtre conique directionnelle et un collimateur rotatif en alliage de tungstène pour une distribution précise du faisceau de rayons X, tout en assurant une protection efficace contre les rayonnements provenant de directions non ciblées.

Chaque type de conteneur de blindage en alliage de tungstène est développé selon une plateforme de matériaux et un système de fabrication unifiés, avec une structure, une fonction et une ergonomie optimisées et adaptées à des scénarios et des contraintes spécifiques. Il permet également une transformation rapide grâce à l'interchangeabilité modulaire. Ce modèle de classification « conception basée sur une plateforme + personnalisation selon les scénarios » garantit que les conteneurs de blindage en alliage de tungstène constituent une solution complète de radioprotection, permettant aux clients d'obtenir les solutions personnalisées les plus adaptées, qu'ils soient situés dans des hôpitaux, des usines, des laboratoires ou des installations de stockage de déchets.

### 3.2.1 Conteneur de blindage en alliage de tungstène pour l'industrie nucléaire

Le conteneur de blindage en alliage de tungstène, conçu spécifiquement pour l'industrie nucléaire, est une structure robuste adaptée aux chambres chaudes de production d'isotopes, aux canaux d'irradiation des réacteurs de recherche, aux lignes de distribution de produits radiochimiques et aux installations de stockage temporaire de déchets de haute activité. Son objectif est unique : garantir un confinement absolu et un blindage permanent dans les environnements les plus exigeants, caractérisés par des champs de rayonnement mixtes complexes, une durée de vie maximale et un fonctionnement quasi autonome.

#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT



Ces conteneurs utilisent généralement des alliages tungstène-nickel-fer à haute résistance, à très forte teneur en tungstène et à épaisseur variable (plus mince à l'extérieur, plus épaisse à l'intérieur), ce qui peut facilement conduire à un conteneur pesant plusieurs tonnes. Leur structure repose généralement sur un procédé de formage intégral quasi-fini, combiné à un usinage de précision des trous borgnes profonds, afin de garantir que l'épaisseur de pénétration minimale pour chaque trajet de rayonnement réponde aux exigences de décroissance des nucléides à longue durée de vie tels que le cobalt-60, le césium-137 et le strontium-90, et ce, durant toute leur période de décroissance. Le système de couvercle du conteneur est souvent redondant, avec des couvercles doubles, voire triples : le couvercle intérieur est soudé par faisceau d'électrons à pleine pénétration pour une étanchéité permanente, le couvercle intermédiaire est doté d'une serrure hydraulique à ouverture rapide et le couvercle extérieur est équipé de capteurs antivol et de surveillance d'état. L'ensemble de la cavité interne est équipé d'un revêtement sacrificiel remplaçable et d'une couche d'absorption de neutrons composite bore/lithium, assurant un blindage combiné de l'ensemble du spectre  $\gamma$ -neutron- $\alpha$ .

Fonctionnalités hautement intégrées : ce système comprend un mécanisme de levage automatique intégré, une interface de bras robotisé télécommandée, des capteurs multipoints de débit de dose et de température/pression, un anneau de pulvérisation de décontamination automatique et un système de filtration et d'évacuation des eaux usées en ligne. Sa surface est revêtue d'un revêtement composite multicouche haute température anti-oxydation et ultra-résistant à la corrosion, capable de supporter le nettoyage à la vapeur, l'immersion dans de l'acide nitrique concentré et une exposition prolongée aux embruns salins humides sans altérer son brillant. L'interface de transport est conçue selon les normes des conteneurs de type B(U) ou C, permettant un chargement direct dans des véhicules de transport blindés ou des conteneurs maritimes standard.

### 3.2.2 Conteneur de blindage en alliage de tungstène pour applications médicales

Le conteneur blindé en alliage de tungstène à usage médical incarne parfaitement le concept de conception centrée sur l'utilisateur dans le domaine des métaux. Il doit simultanément répondre aux exigences d'absence d'interférences magnétiques, de légèreté, d'ouverture et de fermeture ultra-rapides, de surface miroir facile à nettoyer et de compatibilité avec les salles blanches. Il doit également permettre au personnel médical de réaliser l'opération en quelques secondes et d'une seule main, même lors des gardes de nuit les plus éprouvantes.

Le système de matériaux utilise presque exclusivement des alliages tungstène-nickel-cuivre non magnétiques et résistants à la corrosion, éliminant ainsi tout risque de distorsion du champ magnétique dans la salle d'IRM. L'épaisseur des parois est étudiée avec précision : tout en garantissant le respect des normes de débit de dose des radionucléides médicaux tels que les générateurs molybdène-technétium, le fluor-18 et l'iode-131, le poids est considérablement réduit par rapport à celui des conteneurs en plomb, permettant ainsi au personnel soignant de les manipuler facilement d'une seule main. La conception privilégie une grande facilité d'utilisation : le couvercle à ouverture rapide s'ouvre en trois secondes grâce à une molette actionnée par un doigt ou une pédale, et se verrouille en une seconde ; le couvercle est doté d'un système d'autocentrage par gravité et d'un positionnement assisté magnétique, permettant un alignement parfait même avec trois paires de gants ; l'intérieur de la cavité présente des angles arrondis

#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT



et une finition polie miroir, permettant un nettoyage aisé avec des lingettes spéciales pour retrouver sa propreté d'origine.

Les produits typiques comprennent des manchons de protection pour seringues, des conteneurs pour générateurs molybdène-technétium, des conteneurs de distribution de FDG, des conteneurs pour l'implantation de sources de semences d'iode-125 et des conteneurs de stockage de pansements au strontium-90. Leur aspect n'est plus le gris froid et industriel, mais plutôt un revêtement décoratif anodisé ou PVD or/bleu, améliorant l'esthétique de l'environnement stérile et facilitant la différenciation visuelle des différents nucléides. Les surfaces sont également souvent gravées au laser de façon permanente avec les symboles des nucléides, les limites d'activité et les dates de péremption, éliminant ainsi tout risque d'erreur d'étiquetage dû au décollement des étiquettes.

C'est précisément grâce à ces détails médicaux apparemment mineurs que les cartouches de protection en alliage de tungstène peuvent être intégrées sans problème dans les centres PET-CT les plus fréquentés et les usines pharmaceutiques aux normes BPF les plus strictes, permettant ainsi au personnel médical de concentrer toute son énergie sur les patients sans se soucier de la protection ou de la contamination.

### 3.2.3 Conteneur de blindage en alliage de tungstène pour essais industriels

Le boîtier de blindage en alliage de tungstène, conçu spécifiquement pour l'inspection industrielle, est une combinaison « forteresse mobile + fenêtre de précision » optimisée pour les essais non destructifs, l'inspection des soudures de pipelines, l'endoscopie de fonderie et les équipements d'inspection de sécurité douanière. Il doit assurer un blindage haute résistance complet tout en permettant une sortie de faisceau précise et contrôlable, afin de garantir qu'« aucun photon ne fuit là où il doit être bloqué, et qu'aucun millimètre ne s'écarte de sa sortie ».

Les matériaux utilisés sont principalement des alliages tungstène-nickel-fer à haute résistance, garantissant l'indéformabilité de la cuve lors des travaux sur site, des manutentions fréquentes par grue, voire des chutes accidentelles. Sa principale caractéristique structurelle réside dans la conception de la fenêtre de collimation directionnelle : le corps principal de la cuve est entièrement clos à 360° par d'épaisses parois, et des collimateurs rotatifs en alliage de tungstène, sous forme de cônes, d'éventails ou de fentes, sont présents sur un ou plusieurs côtés. L'angle et la largeur du faisceau sont réglés avec précision par une molette ou un moteur externe, permettant ainsi une projection précise des rayons X sur la soudure ou la pièce à contrôler, tout en assurant une protection optimale des opérateurs et de l'environnement.

Les produits typiques comprennent des conteneurs pour la détection de défauts à l'iridium-192, des conteneurs pour l'inspection de canalisations au sélénium-75, des conteneurs pour l'irradiation de grandes pièces au cobalt-60 et des capots de protection intégrés pour les têtes d'examen radiographique. Ces conteneurs sont souvent conçus comme des plateformes mobiles intégrées, montées sur châssis à roues ou sur chariot élévateur, permettant un accès direct aux chambres noires de détection de défauts ou aux chantiers. Le collimateur utilise des plaques multicouches imbriquées en alliage de tungstène et un moteur pas à pas, garantissant une résolution angulaire extrêmement élevée sans diffusion. Sa surface est

#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

revêtue d'un revêtement en polyurée de qualité industrielle, résistant à l'huile et au sable, adapté aux environnements les plus difficiles tels que les champs pétroliers, les chantiers navals et les sites de construction.

Le système d'étanchéité met l'accent sur la capacité de remplacement rapide de la source : le couvercle utilise des pinces à verrouillage rapide et des doubles joints toriques, ainsi qu'un outil spécial de remplacement de source, permettant aux opérateurs d'effectuer le chargement et le retrait de la source à l'extérieur de la chambre noire, avec une exposition du personnel à un rayonnement quasi nul tout au long du processus.

### 3.3 Types courants de boîtiers de protection en alliage de tungstène classés selon leur structure

Du point de vue de leur structure et de leur mode d'installation, les conteneurs de blindage en alliage de tungstène se répartissent en quatre grandes catégories : fixes, portables, transportables et modulaires. Les deux premières représentent la plus grande part de marché au niveau mondial, couvrant près de 90 % des besoins réels.

#### 3.3.1 Boîtier blindé fixe en alliage de tungstène

Le boîtier de blindage fixe en alliage de tungstène est le véritable cœur de la chambre chaude. Une fois installé, il reste quasiment immobile pendant toute sa durée de vie. Sa conception privilégie une efficacité de blindage optimale, une durée de vie extrêmement longue sans entretien et une intégration maximale, sans aucun compromis sur le poids et le volume.

Ces réservoirs sont généralement fabriqués par formage quasi-net, à partir d'ébauches pesant plusieurs tonnes, voire des dizaines de tonnes. L'épaisseur des parois varie de quelques dizaines de millimètres à deux ou trois cents millimètres, calculée exclusivement en fonction du scénario le plus défavorable au sein de la chambre chaude. Le corps du réservoir est fixé rigidement à la fondation par des boulons d'ancrage pré-encastés en alliage de tungstène ou en acier haute résistance, éliminant ainsi tout risque d'usure par frottement et de défaillance d'étanchéité dues aux vibrations prolongées. Le système de couverture du réservoir utilise principalement des panneaux à ouverture rapide hydrauliques ou pneumatiques, associés à des ponts roulants et des bras robotisés pour une ouverture et une fermeture entièrement automatisées. Les grandes chambres chaudes emploient même des structures à double ou triple couverture : la couche intérieure est un réservoir interne en alliage de tungstène soudé de façon permanente, la couche intermédiaire est un panneau à ouverture rapide pour les opérations courantes, et la couche extérieure est une couverture de sécurité étanche à la poussière et anti-accidents.

L'intégration fonctionnelle est sans égale : la cavité interne comprend des revêtements sacrificiels multicouches remplaçables, une plateforme de levage automatique de la source, un réservoir de collecte des liquides usés et un anneau de pulvérisation de décontamination en ligne ; les parois latérales sont pré-équipées de larges fenêtres d'observation en verre au plomb, d'interfaces pour bras robotisé multicanaux et de capteurs de débit, de température et de pression ; le fond est directement relié au système de traitement des liquides usés de la chambre chaude pour un pompage et une filtration

#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

automatiques. L'ensemble de la surface est revêtu d'un revêtement multicouche haute température anti-oxydation et ultra-résistant à la corrosion, capable de supporter des décennies de purge à la vapeur et de nettoyage à l'acide puissant sans altérer son éclat.

Les conteneurs blindés fixes en alliage de tungstène sont généralement conçus pour durer plus de trente ans, période durant laquelle ils ne nécessitent quasiment aucun entretien, aucune pièce de rechange et aucun remplacement complet. Tel un bâtiment miniature en alliage de tungstène, il est solidement ancré au centre de la chambre chaude, bloquant définitivement la source de rayonnement la plus dangereuse dans la position la plus sûre, permettant ainsi à l'ensemble de la chambre chaude de fonctionner pendant des décennies grâce à ce « cœur de tungstène » immuable.

### 3.3.2 Boîte blindée portable en alliage de tungstène

Les cartouches de protection portables en alliage de tungstène sont comme des « forteresses que l'on peut emporter partout avec soi ». Elles concentrent la plupart des capacités de protection des cartouches fixes dans un volume qu'une infirmière, un technicien ou un opérateur de terrain peut facilement soulever, pousser ou même porter sur son dos, ce qui représente un équilibre entre légèreté et praticité dans les alliages de tungstène.

La maîtrise du poids est essentielle à la portabilité. L'équipe de conception a utilisé des techniques précises de tracé de rayons Monte Carlo et d'optimisation topologique pour garantir une utilisation optimale de chaque gramme d'alliage de tungstène : les points les plus épais se situent en haut et en bas de la source, avec un amincissement progressif et optimisé sur le pourtour. Une fine coque résistante aux chocs, en alliage de tungstène ou de titane, est ensuite ajoutée à la surface extérieure, assurant des débits de dose adéquats dans toutes les directions tout en réduisant le poids total à une fraction de celui d'une cartouche en plomb. Les cartouches médicales portables classiques pèsent de quelques kilogrammes à plusieurs dizaines de kilogrammes, ce qui permet aux techniciens de les soulever facilement d'une main, aux infirmières de les pousser sur un chariot et aux médecins de les transporter directement au bloc opératoire.

Le design privilégie le minimalisme et la rapidité : le couvercle est généralement doté d'une molette à ouverture rapide ou d'un mécanisme magnétique, s'ouvrant en trois secondes et se verrouillant en une seconde, assurant une prise en main sûre même avec trois paires de gants ; la poignée, forgée d'une seule pièce, est ergonomique pour un confort optimal lors d'une utilisation prolongée ; et les quatre coins de la base sont souvent équipés de roulettes médicales et de freins électromagnétiques, permettant un arrêt précis sur la table d'injection ou au chevet du patient par une simple poussée. L'ensemble de la surface est poli miroir et bénéficie d'une anodisation bleue ou dorée de qualité médicale, offrant une finition esthétique et facile à nettoyer, s'intégrant parfaitement dans un environnement stérile.

Les produits typiques comprennent des conteneurs de protection pour injection de fluor-18, des conteneurs de transport pour générateurs molybdène-technétium, des conteneurs de traitement à l'iode-131, des conteneurs pour sources d'étalonnage au germanium-68 et des conteneurs portables de collecte des déchets radioactifs. Ces conteneurs intègrent souvent des affichages de débit de dose, des alertes

#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

d'activité résiduelle et une identification NFC, permettant une intégration directe aux systèmes d'information hospitaliers pour un suivi électronique complet de la source. Les conteneurs portables blindés en alliage de tungstène, grâce à leur taille minimale, leur poids ultra-léger et leur système d'ouverture et de fermeture ultra-rapide, apportent le sentiment de sécurité d'une « forteresse de tungstène » de conteneur fixe aux salles d'hospitalisation, aux tables d'opération, aux ambulances et même aux domiciles des patients, garantissant ainsi un contrôle absolu à chaque seconde, de la production à l'administration des produits radiopharmaceutiques.

### 3.3.3 Boîtier blindé en alliage de tungstène scellé

Les conteneurs blindés en alliage de tungstène étanches représentent le nec plus ultra en matière de confinement et de blindage. Ils respectent le principe fondamental d'« empêcher absolument toute fuite de matière radioactive, sous quelque forme que ce soit ». Ils conviennent à toutes les situations exigeant une étanchéité parfaite, le stockage à long terme, le transport ou le fonctionnement sans surveillance, depuis les réservoirs de collecte de déchets de haute activité jusqu'aux conteneurs de type B pour le transport intercontinental.

Sur le plan structurel, le réservoir étanche abandonne tout bouchon mobile susceptible d'être ouvert à plusieurs reprises, privilégiant une conception minimaliste avec une fermeture définitive ou un système d'ouverture et de fermeture extrêmement fiable après une utilisation minimale. Généralement, après le chargement de la source, le corps du réservoir et le bouchon bénéficient d'une étanchéité permanente de qualité métallurgique grâce à un soudage par faisceau d'électrons à pleine pénétration, un brasage sous vide ou un soudage par explosion. Les cordons de soudure sont contrôlés par spectrométrie de masse à l'hélium et par contrôle des défauts aux rayons X afin de garantir un taux de fuite si faible qu'il est indétectable par les instruments. Certains modèles nécessitant un chargement occasionnel de la source conservent un bouchon à ouverture rapide de très grand diamètre, mais le système d'ouverture du bouchon et du réservoir utilise une structure à « triple sécurité » avec un labyrinthe métallique dur à trois niveaux ou plus, des joints d'étanchéité doubles en forme de C en métal résistant aux radiations et un verrouillage par pince hydraulique, garantissant une étanchéité parfaite au niveau moléculaire, même après de nombreux cycles d'ouverture et de fermeture.

L'intégralité de la cavité interne est équipée de doublures sacrificielles remplaçables et d'éléments filtrants multi-étapes. Les aérosols radioactifs, l'iode volatil et les vapeurs de tritium sont adsorbés physiquement par la première couche, capturés chimiquement par la deuxième et totalement éliminés par la troisième couche de filtration HEPA. De multiples capteurs de pression, de température, de débit de dose et de concentration en hydrogène sont intégrés aux parois latérales du réservoir et transmettent les données en temps réel par câbles blindés ou sans fil, permettant ainsi une surveillance à distance même dans des installations de stockage souterraines profondes ou des conteneurs maritimes.

### 3.3.4 Conteneur de blindage en alliage de tungstène à ouverture supérieure

Le boîtier de blindage en alliage de tungstène de type ouvert va à contre-courant. Il conserve délibérément une ou plusieurs fenêtres ouvertes en permanence, illustrant ainsi le principe de contrôle

#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

précis selon lequel « les rayons X ne vont que là où je le souhaite ». Il est principalement utilisé dans la détection industrielle de défauts par rayons gamma, les expériences d'irradiation pour la recherche scientifique, les têtes d'inspection de sécurité par rayons X des douanes et les systèmes de collimation des accélérateurs linéaires médicaux.

Le corps principal du réservoir conserve sa structure en alliage de tungstène haute densité à parois épaisses, mais des fenêtres de sortie de faisceau coniques, en forme d'éventail, rectangulaires ou en fente sont usinées avec précision sur un ou plusieurs côtés. Chaque fenêtre contient plusieurs couches de blocs collimateurs en alliage de tungstène, rotatifs ou déplaçables indépendamment. L'angle et la largeur du faisceau sont réglables en continu par des vis sans fin externes, des volants ou des servomoteurs. Les directions opposées à la sortie du faisceau restent entièrement confinées par des parois ultra-épaisses afin d'assurer l'absorption complète des rayons diffusés et des fuites. Des guides à queue d'aronde micrométriques ou des guides linéaires à roulement à billes sont utilisés entre les blocs collimateurs pour garantir la stabilité de l'écart et la précision du positionnement, même après des réglages fréquents et prolongés.

Pour garantir la sécurité d'utilisation, les réservoirs ouverts sont généralement équipés de couvercles de protection à verrouillage et de multiples dispositifs de sécurité : la source ne peut être remontée en position de travail que lorsque la fenêtre de collimation est complètement fermée ou que le couvercle de protection est entièrement réarmé ; en cas d'ouverture accidentelle du couvercle, la source redescend automatiquement et d'urgence dans la zone de sécurité au fond du réservoir. Le traitement de surface est également totalement différent de celui des réservoirs fermés, avec une priorité accrue accordée à la résistance aux taches d'huile, au sable, à la poussière et aux rayures mécaniques. L'anodisation dure, la projection thermique supersonique de carbure de tungstène ou le revêtement élastique en polyurée sont couramment utilisés ; ces procédés permettent de conserver la couleur pendant dix ans, même dans les conditions difficiles rencontrées sur les véhicules de contrôle technique, les portiques de chantier naval ou dans les ports douaniers. Les réservoirs blindés en alliage de tungstène à ciel ouvert transforment l'extrême densité de l'alliage de tungstène en un « couteau contrôlable », permettant aux rayons X de couper avec précision les soudures, d'illuminer les tumeurs ou de voir à travers les bagages comme un scalpel, tout en préservant la douceur du « dos du couteau » pour l'opérateur et l'environnement.

### 3.3.5 Le blindage monocouche en alliage de tungstène peut

Les conteneurs de blindage en alliage de tungstène monocouche représentent l'expression la plus pure et authentique de la technologie de blindage en alliage de tungstène. Ils confient l'intégralité du blindage au corps en alliage de tungstène lui-même, constitué d'un seul matériau et d'une seule épaisseur de paroi, sans aucun revêtement composite, couche de transition à gradient ou matériau externe de faible densité. Tout repose uniquement sur la haute densité, l'homogénéité et la stabilité exceptionnelles de l'alliage de tungstène. Ce minimalisme, qui peut paraître austère, est en réalité le fruit d'une confiance absolue dans les performances du matériau. Ce n'est que lorsque la densité, l'homogénéité de la composition, la finesse de la microstructure et la stabilité à long terme sous irradiation de l'alliage de tungstène atteignent des niveaux d'excellence que l'on peut adopter une conception aussi rigoureuse.

#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT



L'ensemble du corps du réservoir, intérieur et extérieur, est fabriqué à partir du même alliage tungstène-nickel-fer ou tungstène-nickel-cuivre, issu du même lot et de la même nuance. L'épaisseur de paroi est calculée de manière prudente lors de la conception, en tenant compte des valeurs les plus basses et d'une durée de vie maximale, puis fabriquée selon le principe de la « marge d'épaisseur supplémentaire ». La surface intérieure est polie miroir, tandis que la surface extérieure reçoit uniquement un fin revêtement anticorrosion ou nettoyant, sans alourdir le réservoir ni compromettre son étanchéité. Le couvercle et le corps du réservoir présentent une conception parfaitement symétrique et intégrée. Le labyrinthe, la surface d'étanchéité et le mécanisme de verrouillage sont usinés directement dans l'alliage de tungstène, éliminant ainsi tout risque de différence de dilatation thermique, de gonflement sous irradiation ou de corrosion galvanique due à l'interface de matériaux dissemblables.

Les avantages d'une structure monocouche sont pleinement démontrés dans des situations extrêmes : aucun risque de fusion et d'écoulement du revêtement à bas point de fusion lors d'incendies à haute température ; aucun risque de délamination ni de fissuration de l'interface composite lors d'une irradiation prolongée à forte dose ; et aucun risque de décollement de la couche externe et d'exposition du substrat de faible densité lors de décontaminages répétés par des acides et des bases forts. Son efficacité de blindage n'augmentera que lentement avec le temps, du fait de la décroissance de la source de rayonnement elle-même, et ne diminuera jamais en raison du vieillissement du matériau.

Ce type de réservoir est principalement utilisé dans les applications exigeant une fiabilité quasi obsessionnelle : réservoirs de déchets permanents, réservoirs de stockage temporaire avant traitement géologique en profondeur, réservoirs de protection pour les sources de chaleur isotopiques embarquées sur satellites, et certains réservoirs médicaux haut de gamme nécessitant une amagnétisme et une résistance à la corrosion absolues. Souvent de petite taille, étonnamment lourds et d'apparence sobre, ils offrent néanmoins une protection optimale et durable contre les fuites, tout en restant extrêmement simples.

### 3.3.6 Le blindage multicouche en alliage de tungstène peut

Les réservoirs de blindage multicouches en alliage de tungstène représentent le summum de l'ingénierie des systèmes dans le domaine des conteneurs de blindage. Au lieu d'utiliser l'alliage de tungstène comme matériau unique, on le décompose en plusieurs sous-couches présentant différentes teneurs en tungstène, différents systèmes de liants et différentes orientations fonctionnelles. Grâce à des composites métallurgiques de précision, au soudage par pressage isostatique à chaud ou au brasage sous vide, une liaison à l'échelle atomique est obtenue, créant ainsi une structure en « sandwich » d'alliage de tungstène avec des compartiments fonctionnels clairement définis, des gradients de performance continus et une structure globale homogène.

La structure la plus classique, de l'intérieur vers l'extérieur, est la suivante :

- La couche la plus interne utilise un grade de densité ultra-élevée avec une phase de tungstène ultra-élevée et une phase de liant faible, spécialement conçue pour une absorption efficace des principaux rayons gamma ;

#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

- L'ajout de traces d'éléments de terres rares ou de bore et de cadmium à la couche intermédiaire permet une capture efficace des neutrons thermiques tout en maintenant une résistance suffisante ;
- La couche extérieure est soit un système non magnétique résistant à la corrosion en tungstène-nickel-cuivre, soit une couche de transition en tungstène-nickel-fer à haute ténacité, qui prend en compte à la fois la résistance à la corrosion de surface et la résistance aux chocs.
- La couche la plus externe peut être un revêtement fonctionnel ultra-mince ou une coque décorative sacrificielle afin de satisfaire à la fois les exigences esthétiques et les besoins de nettoyage final.

Chaque couche d'alliage de tungstène est précisément différenciée en composition, en procédé de frittage et en déformation secondaire. Elles assurent une liaison métallurgique complète à l'interface grâce à une zone de diffusion de transition, sans interfaces macroscopiques, vides microscopiques ni variations brusques de performance. Ce composite multicouche offre trois avantages révolutionnaires : premièrement, une amélioration significative de l'efficacité de blindage. L'absorption intense de la couche interne réduit la probabilité d'échappement des photons de haute énergie, la couche intermédiaire capture précisément les neutrons thermiques et supprime le piégeage gamma, et la couche externe atténue davantage la diffusion à basse énergie. Le système complet atténue le rayonnement plusieurs ordres de grandeur de plus qu'un conteneur monocouche de même poids. Deuxièmement, une optimisation du poids et du volume. Le poids total peut être considérablement réduit tout en conservant la même capacité de blindage, ce qui le rend particulièrement adapté aux conteneurs de transport et aux applications médicales portables. Enfin, une durée de vie et une maintenance grandement améliorées. La couche superficielle est très résistante à la corrosion et peut être réparée localement, tandis que la couche interne, de haute pureté et haute densité, est inaltérable. La boîte entière ressemble à un oignon, chaque couche assurant une protection et étant pelable.

La fabrication de conteneurs de blindage multicouches en alliage de tungstène est extrêmement complexe et exige une maîtrise parfaite de chaque étape, depuis la formulation de la poudre jusqu'à l'usinage final, en passant par le dépôt couche par couche, le frittage par gradient et le soudage du revêtement. Une fois maîtrisée, cette technologie offre des performances exceptionnelles et une large gamme d'applications, répondant ainsi à la quasi-totalité des besoins les plus exigeants, des conteneurs miniatures pour le traitement des substances médicales aux gigantesques conteneurs pour le transport des déchets. Il ne s'agit plus d'un simple morceau d'alliage de tungstène, mais d'une véritable symphonie, où chaque couche contribue de manière optimale à sa propre bande de fréquence, créant ainsi un blindage d'une efficacité redoutable.

### 3.3.7 Boîtier de blindage intégré en alliage de tungstène

Le réservoir de protection intégré en alliage de tungstène représente le summum de la technologie de formage quasi-fini des alliages de tungstène. Sa principale caractéristique réside dans le fait que le corps du réservoir, le fond du couvercle, les pattes de levage, la surface d'étanchéité labyrinthique, les parties intégrées des interfaces fonctionnelles, et même certaines structures de collimation, sont tous formés et usinés avec précision à partir d'une seule ébauche en une seule opération, éliminant ainsi toute forme de

#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

soudure, de brasage ou de joint d'assemblage mécanique, et réalisant un continuum en alliage de tungstène parfaitement homogène de l'intérieur vers l'extérieur et de haut en bas.

La préparation des ébauches fait généralement appel à un pressage isostatique à froid de très grande taille combiné à un frittage en deux étapes sous vide et hydrogène à haute température, ou à un procédé de revêtement par pressage isostatique à chaud direct. On obtient ainsi des ébauches uniques pesant plusieurs tonnes, voire plus, atteignant les limites théoriques en termes de densité, d'uniformité de composition et de régularité de la microstructure. Des trous borgnes profonds sont ensuite usinés à l'aide d'un foret à canon haute rigidité, d'un rodage multi-axes et d'un usinage composite électrolytique assisté par ultrasons, afin de pénétrer en une seule passe la cavité présentant un rapport profondeur/diamètre extrêmement élevé. Le contour extérieur, les pattes de levage, les gradins en labyrinthe, le cadre de la fenêtre d'observation et les filetages pré-intégrés pour les trous de contrôle de dose sont tous réalisés par électroérosion à fil CNC de haute précision avec cinq axes ou plus et par rectification miroir. Le produit final ne conserve macroscopiquement qu'une seule surface de joint de couvercle ouvrant/fermant ; les autres zones sont totalement exemptes d'interfaces, de zones affectées thermiquement et de sources de concentration de contraintes résiduelles.

Cette conception intégrée et rigoureuse apporte plusieurs avantages techniques significatifs :

- Lorsque la continuité du blindage atteint sa limite physique, les rayons ne peuvent plus trouver de canaux de faible densité ni de régions d'amplification de la diffusion à l'interface.
- La rigidité structurelle et la résistance aux chocs sont grandement améliorées, et il n'y aura aucune fissuration des soudures ni aucun décollement de l'interface, même sous des charges de chute ou sismiques extrêmes.
- La fidélité géométrique est optimale sous irradiation à long terme, et il n'y a pas de déformation ou de défaillance d'étanchéité causée par des différences dans le coefficient de gonflement des différentes régions ;
- Il offre les meilleures performances de nettoyage de surface, sans recoins, interstices ni aspérités microscopiques susceptibles de retenir la saleté et les résidus, et conserve un fini miroir jusqu'à son grattage.

Les conteneurs de blindage intégrés en alliage de tungstène sont principalement utilisés dans des scénarios présentant les exigences de fiabilité les plus élevées et des restrictions de poids et de volume relativement souples : conteneurs de cœur pour les grandes chambres chaudes de production d'isotopes, conteneurs d'insertion permanents pour les canaux d'irradiation dans les réacteurs de recherche, conteneurs de protection intégrés pour les sources de chaleur isotopiques des satellites et conteneurs de déchets stratégiques nationaux.

### 3.3.8 Boîtier de blindage modulaire en alliage de tungstène

Les conteneurs de blindage modulaires en alliage de tungstène bouleversent la philosophie intégrée, privilégiant une approche système hautement modulaire, évolutive et assemblable sur site. Ils décomposent les tâches complexes de blindage en une série de modules fonctionnels standard ou semi-

#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

standard (corps principal, joint d'étanchéité supérieur, support inférieur, absorbeur de neutrons, fenêtre de collimation, interface de surveillance, enveloppe de protection de surface, etc.), assurant des connexions fiables grâce à des brides de haute précision, des colliers de serrage, des goupilles à verrouillage rapide ou des brasages sous vide. Ceci permet des ajustements flexibles de la configuration finale sur site en fonction des modifications des paramètres de la source, des contraintes d'espace ou des évolutions réglementaires.

Le principe de conception modulaire repose sur la standardisation et l'interchangeabilité des interfaces : toutes les sections cylindriques présentent un diamètre extérieur, un diamètre intérieur, un gradient d'épaisseur de paroi, un motif en labyrinthe et une rugosité de surface d'étanchéité parfaitement uniformes, permettant une connexion sans faille entre deux sections quelconques. Les modules fonctionnels adoptent une structure à tiroir ou à insertion radiale, permettant l'ajout ou le retrait de couches d'absorption de neutrons, le remplacement des fenêtres de collimation et la mise à niveau des sondes de surveillance sans interruption de production en dehors de la zone d'échange thermique. L'enveloppe de protection extérieure et le plateau amortisseur sont également modulaires, permettant un changement rapide selon les exigences du transport routier, ferroviaire, maritime ou aérien. Les points de connexion utilisent généralement un système de triple sécurité composé de doubles joints toriques, de soufflets métalliques et de ports de détection de fuites par spectromètre de masse à hélium, garantissant que le taux de fuite global après assemblage est parfaitement équivalent à celui d'un réservoir intégré.

Cette architecture modulaire offre une flexibilité d'ingénierie et des économies de cycle de vie sans précédent :

- L'investissement initial peut être mis en œuvre par étapes, en commençant par la section du cylindre de blindage principal, puis en ajoutant progressivement des modules fonctionnels à mesure que la capacité de production augmente.
- Lors de la mise à niveau d'un élément source, seuls certains plugins doivent être remplacés ; il n'est pas nécessaire de supprimer et de reconstruire l'élément entier.
- La maintenance et la décontamination peuvent être effectuées au niveau du module, et les pièces contaminées peuvent être retirées séparément pour un traitement thermique en extérieur, réduisant considérablement l'exposition du personnel aux rayonnements et la quantité de déchets secondaires.
- Lors de sa mise hors service, il peut être démonté et recyclé couche par couche, le corps en alliage de tungstène, les composants fonctionnels et les joints entrant tous dans différents circuits de réutilisation, permettant ainsi de réaliser un véritable cycle fermé écologique.

Les conteneurs de blindage modulaires en alliage de tungstène sont largement utilisés dans les principaux sites de production d'isotopes au monde, les centres de médecine nucléaire urbains les plus fréquentés et les installations d'irradiation industrielle nécessitant des mises à niveau et des extensions fréquentes. Grâce à des modules standardisés et à un assemblage sur site, le système de blindage en alliage de tungstène passe d'un produit unique à une plateforme ouverte, évolutive et adaptable en continu. Cette plateforme répond parfaitement aux exigences fondamentales de l'ingénierie moderne de la radioprotection, permettant une itération rapide et une adaptation à de multiples scénarios.

#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

## Chapitre 4 Procédé de fabrication des boîtiers de protection en alliage de tungstène

### 4.1 Composition et exigences relatives aux matières premières des réservoirs de protection en alliage de tungstène

Les conteneurs de blindage en alliage de tungstène surpassent largement les composants structurels ou les matériaux de radioprotection ordinaires. Il s'agit essentiellement d'un projet d'ingénierie systématique impliquant une purification extrême, un contrôle précis de la granulométrie, une activité constante et une stabilisation d'un lot à l'autre des poudres de tungstène, de nickel, de fer, de cuivre et d'additifs fonctionnels à l'état de traces. Ce n'est que lorsque chaque gramme de poudre atteint une qualité quasi pharmaceutique que le produit final peut garantir l'absence de défauts, d'atténuation et de contamination, même après des décennies d'irradiation à haut volume, de corrosion intense et de décontamination répétées, et dans des conditions d'utilisation extrêmes et imprévues.

Le système de matières premières comprend principalement de la poudre de tungstène de haute pureté, des poudres métalliques de liant (nickel, fer, cuivre), des poudres fonctionnelles absorbant les neutrons (borures, composés de cadmium, oxydes de terres rares, etc.) et des poudres auxiliaires de procédé (agents de formage, dégraissants, activateurs de frittage). Toutes les poudres sont soumises à une traçabilité complète, depuis l'extraction du minerai, la cristallisation du paratungstate d'ammonium, la réduction du tungstène/tungstène bleu jusqu'à la réduction finale de la poudre de tungstène par l'hydrogène. Chaque étape est identifiée par un code de lot unique et fait l'objet d'un rapport d'analyses physico-chimiques complet. Même de légères variations entre les lots peuvent entraîner des différences inacceptables dans la granulométrie du tungstène, la teneur en oxygène, le profil d'impuretés ou l'activité de réduction, ce qui peut engendrer des zones de faible densité ou des points chauds d'activation dans les parties les plus fines ou les plus profondes de l'enceinte de protection.

#### 4.1.1 Proportion des principales matières premières du réservoir de protection en alliage de tungstène

Les boîtiers de protection en alliage de tungstène ont depuis longtemps dépassé le stade traditionnel des « proportions empiriques », pour évoluer vers un système d'optimisation multicritères précis, basé sur le spectre de la source, l'environnement d'utilisation, les exigences réglementaires et le coût du cycle de vie. Le principe de conception repose sur l'utilisation de la poudre de tungstène comme composant principal, et sur le liant et les additifs fonctionnels comme « gènes fonctionnels » précisément contrôlables. Grâce à une analyse en boucle fermée de la composition, de la microstructure, des performances et du scénario d'application, la solution optimale est obtenue pour chaque type de boîtier de protection.

La poudre de tungstène constitue l'élément dominant de la composition, sa fraction massique étant volontairement portée à un niveau extrêmement élevé afin de garantir une densité macroscopique, une densité atomique et une section efficace d'absorption photoélectrique maximales, tout en assurant un réseau de contact direct tungstène-tungstène suffisant pour une déformation secondaire ultérieure. Le système de phase liante est divisé en trois principales voies techniques en fonction de son application finale :

#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT



- Le système nickel-fer est devenu le matériau de prédilection pour les cuves de chambres chaudes et les réservoirs de transport à haute résistance de l'industrie nucléaire, grâce à ses excellentes propriétés mécaniques dynamiques et à sa capacité de modération des neutrons. Un équilibre précis entre résistance, ténacité et capacité de piégeage des neutrons peut être obtenu en ajustant finement le rapport nickel/fer.
- Le système nickel-cuivre est le seul choix possible pour les réservoirs de médecine nucléaire et de stockage de liquides usés grâce à ses propriétés totalement amagnétiques, sa haute résistance à la corrosion et son excellente aptitude au travail à chaud comme à froid. Une légère variation de la teneur en cuivre influe directement sur l'épaisseur du film de passivation de surface et sur le risque de piqûration.
- Le système ternaire nickel-fer-cuivre, en tant que compromis haut de gamme, combine résistance, amagnétisme et résistance à la corrosion, et est utilisé dans les conteneurs de transport de type B avec les exigences de performance globales les plus strictes.

Des éléments fonctionnels absorbant les neutrons sont ajoutés avec précision sous forme de composés lors de la fusion et de l'infiltration de la phase liante ou lors du mélange des poudres. Le bore est dispersé sous forme de carbure ou de nitrure de bore, les terres rares sous forme d'oxydes ou de poudres métalliques, et le cadmium ou le gadolinium sous forme de poudres pré-alliées. Ceci permet d'optimiser la section efficace d'absorption des neutrons thermiques sans compromettre la continuité de la structure en tungstène, tout en contrôlant rigoureusement l'énergie du rayonnement secondaire des rayons gamma capturés.

Le choix des activateurs de procédé et des agents de mise en forme est tout aussi important. Des traces de palladium, d'éléments du groupe platine ou d'oxydes de terres rares peuvent être utilisées comme activateurs de frittage pour abaisser la température d'apparition de la phase liquide sans altérer la pureté du tungstène, favorisant ainsi un mouillage complet des particules de tungstène par la phase liante. Les agents de mise en forme doivent être des polymères de qualité médicale qui se volatilisent totalement lors du dégraissage, sans laisser de résidus de carbone ni de cendres, afin de garantir une porosité nulle et une absence totale de contamination carbonée après frittage.

Après vérification de la formulation finale sur un petit lot en laboratoire, celle-ci doit subir un processus de validation complet comprenant une production pilote, une évaluation de la stabilité du lot, un test de vieillissement sous irradiation, des tests de décontamination et de corrosion, ainsi qu'un étalonnage radiographique du réservoir. Ce n'est que lorsque tous les indicateurs de performance atteignent simultanément les objectifs de conception et que la variation d'un lot à l'autre est inférieure à la tolérance minimale que la formulation est officiellement intégrée à la norme interne de l'entreprise et inscrite sur le certificat de matériau de chaque réservoir de protection.

#### 4.1.2 Exigences de pureté et de granulométrie des matières premières pour les réservoirs de protection en alliage de tungstène

Les conteneurs de blindage en alliage de tungstène représentent un niveau de pointe dans le domaine des matériaux à base de tungstène. Le principe sous-jacent est que la moindre trace d'impuretés nocives ou

##### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

une dispersion granulométrique peuvent se transformer en nucléides activés à longue durée de vie sous l'effet d'une irradiation à forte dose, devenir des sources d'amorçage de corrosion par piqûres lors de fortes opérations de corrosion et de décontamination, et créer une zone de faible densité au niveau des parties les plus fines des cavités profondes, compromettant ainsi la fiabilité à long terme de l'ensemble du conteneur.

La pureté de la poudre de tungstène doit atteindre un niveau « ultra-pharmaceutique », avec des taux d'impuretés totales extrêmement faibles et une teneur strictement contrôlée en éléments nocifs (molybdène, niobium, tantale, titane, phosphore, soufre, oxygène, carbone, hydrogène, azote, potassium, sodium, etc.). La teneur en oxygène est considérée comme le principal facteur de dégradation, car l'oxygène résiduel réagit avec le tungstène lors du frittage pour former des oxydes volatils, créant ainsi des pores micrométriques. La teneur en carbone doit être précisément équilibrée ; une teneur trop élevée conduit à un carbure de tungstène cassant, tandis qu'une teneur trop faible entraîne une perte de la capacité à inhiber la croissance anormale des grains. La détection des impuretés repose sur une triple vérification par spectrométrie de masse à décharge lumineuse, fusion sous gaz inerte avec conductivité thermique infrarouge et spectrométrie de masse à plasma à couplage inductif afin de garantir la constance d'un lot à l'autre.

La distribution granulométrique est contrôlée dans une plage unimodale normale extrêmement étroite. Une poudre trop fine ne peut provoquer de retrait de frittage irrégulier, ni une poudre trop grossière des fractures localisées dans la structure tungstène-tungstène. Les statistiques de granulométrie obtenues par la méthode de Fisher, la granulométrie par diffraction laser et la microscopie électronique à balayage doivent parfaitement correspondre ; tout écart entraîne la mise au rebut du lot entier. Les exigences de pureté des poudres de nickel, de fer et de cuivre utilisées comme liant sont tout aussi strictes. La poudre de nickel doit être exempte d'éléments magnétiques et corrosifs tels que le cobalt, le soufre et le phosphore ; la poudre de fer doit présenter des teneurs extrêmement faibles en silicium, manganèse et oxygène ; et la poudre de cuivre doit être totalement exempte d'impuretés à bas point de fusion telles que l'arsenic, le bismuth et le tellure. Toutes les poudres subissent un dégazage sous vide, une réduction secondaire à l'hydrogène et une sphéroïdisation par plasma avant leur entrée en usine afin de garantir une activité de surface homogène, l'absence de gaz adsorbés et l'absence d'agglomération.

#### **4.1.3 Critères de sélection et exigences relatives aux matériaux auxiliaires des réservoirs de protection en alliage de tungstène**

Dans le système de fabrication des réservoirs de protection en alliage de tungstène, bien que les matériaux auxiliaires n'entrent pas dans la composition finale, ils jouent un rôle crucial en coulisses à chaque étape de formage, de déliantage, de frittage et de post-traitement. Ils doivent répondre aux quatre principes stricts suivants : être « indispensables au processus, disparaître complètement pendant l'utilisation, ne laisser aucun résidu après disparition et ne contenir aucun résidu nocif ».

L'agent de moulage privilégié est un copolymère de polyéthylène glycol et d'alcool polyvinylique de qualité médicale ou un système composite haut de gamme à base de paraffine. Il doit présenter une excellente fluidité et une bonne tenue de forme lors du moulage par injection à basse température ou du

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

pressage isostatique à froid, et se pyrolyser et se volatiliser complètement à des températures bien inférieures à la température de frittage lors de l'étape de dégraissage ultérieure, avec une teneur résiduelle en carbone et en cendres proche de zéro. Toute matière organique résiduelle peut réagir avec le tungstène lors du frittage sous hydrogène à haute température pour former une phase de carbure de tungstène fragile, ou se volatiliser et contaminer le four lors du frittage sous vide, entraînant une contamination croisée entre lots.

Le catalyseur de dégraissage et le purificateur d'atmosphère de frittage sont généralement des systèmes de dopage à l'acide nitrique de haute pureté ou au peroxyde d'hydrogène à l'état de traces, utilisés pour accélérer le craquage de l'agent de formation et capturer l'oxygène et le carbone résiduels. Ils doivent être complètement éliminés à la fin de l'étape de dégraissage, et les pressions partielles d'oxygène et de carbone résiduels dans le four doivent être surveillées en temps réel jusqu'à ce que le seuil de détection de l'instrument soit atteint.

Le support de frittage et l'agent de démoulage de l'ébauche sont revêtus d'alumine, d'oxyde d'yttrium ou de nitrure de bore de très haute pureté, garantissant l'absence de réaction, d'adhérence et de diffusion d'éléments avec l'alliage de tungstène à la température de frittage maximale. Tout décollement du support ou résidu d'agent de démoulage peut engendrer des piqûres superficielles sur l'ébauche, créant ainsi des zones inaccessibles au nettoyage ultérieur ou amorçant une corrosion par piqûres.

Les produits auxiliaires de traitement de surface (solution de nickelage chimique, résine de nettoyage et de revêtement, gaz de nitruration ionique, précurseur de carbone amorphe) répondent également aux normes de pureté pharmaceutiques. La solution de nickelage doit être exempte de cyanure et de stabilisants à base de métaux lourds, la résine de revêtement doit être exempte de solvants à base de benzène et de formaldéhyde libre, et la pureté, l'humidité et la teneur en oxygène du gaz de nitruration doivent être maintenues à des niveaux extrêmement bas.

Vérification complète du processus par simulation avant la production en série : à partir d'ébauches réelles en alliage de tungstène, le cycle complet de formage, dégraissage, frittage et traitement de surface est réalisé selon les paramètres réels du procédé. Une analyse approfondie par spectrométrie de masse à décharge lumineuse résiduelle et une analyse d'activation par irradiation sont ensuite effectuées sur les produits finis. La production en série n'est autorisée qu'après confirmation de l'absence d'impuretés introduites par le procédé.

## 4.2 Procédé de fabrication du blindage en alliage de tungstène

tungstène ne repose sur une ligne de production dédiée, entièrement sécurisée, traçable et exempte de toute contamination. Son principe fondamental consiste à exploiter pleinement et uniformément le potentiel de chaque gramme de poudre pour obtenir les performances optimales de la partie la plus fine et la plus profonde de la boîte finale, éliminant ainsi les zones de faible densité, les irrégularités de structure et les défauts résiduels dus aux fluctuations du processus.

### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

#### 4.2.1 Procédé de métallurgie des poudres de base pour les réservoirs blindés en alliage de tungstène (préparation de la poudre, mélange, pressage)

Les trois grandes étapes de la mise en poudre, du mélange et du pressage sont considérées comme l'étape de « génie génétique » de l'ensemble de la chaîne de fabrication, ce qui détermine que tous les processus ultérieurs à haute température ne peuvent qu'ajouter la cerise sur le gâteau, mais ne peuvent jamais fournir un soutien essentiel.

L'étape de fabrication de la poudre s'affranchit totalement de la méthode traditionnelle de réduction par l'hydrogène, au profit d'un procédé composite multi-étapes à température variable, point de rosée de l'hydrogène variable et débit variable, appelé « réduction précise par gradient + resphéroïdisation plasma ». La poudre de tungstène subit d'abord une réduction douce de sa couche d'oxyde externe dans une zone de basse température et de faible point de rosée, puis la température augmente progressivement pour atteindre une zone de réduction plus profonde. Enfin, elle subit une sphéroïdisation des particules et un dégazage final dans une chambre de sphéroïdisation au plasma d'argon de haute pureté, ce qui permet d'obtenir une poudre de tungstène présentant une distribution granulométrique extrêmement étroite, une sphéricité parfaite, des teneurs en oxygène et en carbone ultra-faibles et une densité apparente extrêmement élevée. Les poudres de nickel, de fer et de cuivre sont produites respectivement par une méthode au carbonyle et par une méthode d'atomisation-dégazage sous vide-réduction secondaire à l'hydrogène, garantissant ainsi des particules quasi sphériques, sans vides internes ni couches d'adsorption en surface.

Le mélange est l'étape cruciale qui détermine l'homogénéité des conteneurs de blindage en alliage de tungstène. Les usines leaders du secteur utilisent généralement des mélangeurs de poudres composites à double mouvement planétaire-vortex ou des mélangeurs tridimensionnels de très grande capacité. La paroi interne de la cuve de mélange et le rotor sont entièrement revêtus d'oxyde de tungstène ou d'yttrium de haute pureté, éliminant ainsi toute contamination externe par des éléments du groupe fer. Le processus de mélange comprend quatre sous-étapes : mélange à sec, mélange humide, dégazage sous vide et second mélange à sec. Tout d'abord, sous atmosphère d'argon de haute pureté, une homogénéisation spatiale préliminaire des poudres de tungstène et de liant est réalisée. Ensuite, de l'éthanol anhydre de qualité médicale ou de l'isopropanol de haute pureté est ajouté pour former une suspension permettant une dispersion par vortex profonde. Le solvant est ensuite évaporé lentement sous vide. Enfin, un dernier mélange à sec est effectué pour éliminer tout agglomérat résiduel. Le cycle de mélange complet dure des dizaines d'heures, pendant lesquelles un échantillonnage en temps réel est effectué pour l'analyse de la taille des particules par laser, MEB et chromatographie de la composition chimique afin de garantir que les particules de tungstène et les particules de la phase liante atteignent une uniformité statistiquement parfaite à l'échelle du micron.

Le procédé de pressage s'éloigne radicalement du moulage unidirectionnel traditionnel pour adopter un système de formage « trois en un » qui repose principalement sur le pressage isostatique à froid, complété par le moulage par injection et un pré-compactage par pressage isostatique à chaud. Pour les ébauches de boîtes de petite et moyenne taille, la méthode de pressage isostatique à froid en sac humide est utilisée, assurant une transmission uniforme de la pression jusqu'au cœur de l'ébauche et garantissant une densité

#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT



homogène de la surface au centre. Pour les ébauches de très grande taille ou de forme complexe et irrégulière, des ébauches de haute précision sont d'abord obtenues par moulage par injection à basse température, puis l'ébauche entière est insérée dans un manchon flexible pour le pressage isostatique à froid afin de combler l'espace. Pour les ébauches de boîtes intégrées nécessitant une densité extrêmement élevée, un pressage isostatique à chaud est effectué immédiatement après le pressage isostatique à froid, garantissant ainsi que l'ébauche présente une densité proche de la densité théorique avant son introduction dans le four de frittage. Tous les processus de pressage sont réalisés dans une salle blanche de classe 100 000 ou supérieure, avec des opérateurs entièrement équipés et la surface vierge recouverte d'un film protecteur spécial pour éviter toute contamination par les empreintes digitales, la transpiration ou la poussière.

Le perfectionnement ultime de ces trois procédés fondamentaux constitue la base matérielle du réservoir de protection en alliage de tungstène, garantissant « aucune faiblesse de densité, aucune différence de structure et aucune fluctuation de performance », et fournit également le point de départ idéal pour le frittage à haute température et l'usinage de précision ultérieurs.

#### 4.2.2 Principaux procédés de frittage et contrôle des paramètres pour les réservoirs de protection en alliage de tungstène

Le frittage est l'étape de transformation cruciale pour les réservoirs de blindage en alliage de tungstène, les métamorphosant de simples ébauches haute densité en matériaux de haute performance. C'est également l'étape présentant la température la plus élevée, la durée la plus longue, les variables les plus complexes et l'impact le plus important sur l'efficacité finale du blindage dans toute la chaîne de production. Si des défauts irréversibles surviennent pendant le frittage (tels qu'une phase liquide locale excessive, une ségrégation de la phase liant, une croissance anormale des particules de tungstène ou des microfissures), le réservoir entier sera mis au rebut.

Les conteneurs de blindage haut de gamme en alliage de tungstène sont généralement fabriqués selon un procédé en trois étapes combinant un frittage sous vide et sous hydrogène en deux phases, suivi d'un post-traitement par pressage isostatique à chaud (PIC). La première étape est un préfrittage en phase solide à basse température, où la température est augmentée lentement jusqu'au point critique avant la fusion de la phase liante sous vide poussé. Ce procédé élimine complètement les agents de formage résiduels, les gaz adsorbés et les impuretés volatiles, tout en assurant la liaison initiale entre les particules de tungstène. Cette liaison confère une résistance suffisante pour supporter le réarrangement capillaire lors de l'étape suivante en phase liquide. La deuxième étape est le frittage principal en phase liquide, où le four est alimenté en hydrogène de haute pureté. Dans une plage de température précisément contrôlée, la phase liante fond complètement et imprègne totalement la structure de tungstène. La force capillaire de la phase liquide induit un réarrangement rapide des particules de tungstène, la sphéroïdisation et le retrait des pores, et la densification finale. Dans cette étape, la vitesse de chauffage, le temps de maintien, le point de rosée de l'hydrogène et le gradient de pression du four sont contrôlés en temps réel par un système en boucle fermée ; toute dérive de paramètre déclenche immédiatement l'arrêt automatique du four. La troisième étape consiste en un pressage isostatique à chaud pour la densification finale et l'homogénéisation de la microstructure. Une haute pression uniforme est appliquée dans une enveloppe

#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

d'argon afin d'aplanir complètement les pores fermés résiduels et de favoriser la diffusion uniforme de la phase liante le long des joints de grains des particules de tungstène, permettant ainsi d'atteindre une densité théorique très proche de la limite, tout en éliminant les bandes de ségrégation microscopiques.

L'ensemble de la chambre du four utilise un élément chauffant composite tungstène-molybdène et des écrans radiants multicouches en tungstène-molybdène. Les billettes sont placées sur des creusets en oxyde d'yttrium ultra-pur ou sur des plaques de tungstène revêtues de nitrure de bore. Tous les matériaux de support et d'isolation sont inertes vis-à-vis de l'alliage de tungstène. L'uniformité du champ de température, la pureté de l'atmosphère, la stabilité de la pression et les courbes de chauffage/refroidissement au sein du four sont acquises et archivées en quelques secondes, garantissant une traçabilité complète du processus de frittage pour chaque pièce. À leur sortie du four, les billettes sont immédiatement introduites dans une chambre de refroidissement propre et refroidies lentement sous atmosphère d'argon afin de prévenir la fragilisation par l'hydrogène et la fissuration sous contrainte thermique.

#### 4.2.3 Procédé d'usinage du réservoir de protection en alliage de tungstène

L'usinage est l'étape finale de la transformation des conteneurs de blindage en alliage de tungstène, initialement des ébauches hautes performances, en conteneurs fonctionnels de haute précision. Il constitue également le test d'acceptation ultime de toutes les avancées technologiques précédentes. La moindre rayure, un rayon de congé insuffisant, voire un écart d'un micron dans l'épaisseur de la paroi, peut être à l'origine de futures fuites radioactives ou favoriser la formation de zones non traitées.

La chaîne d'usinage se déroule en quatre étapes : ébauche, finition, ultra-finition et polissage miroir. L'ébauche est réalisée sur un centre d'usinage CNC haute rigidité et robuste, équipé d'outils de coupe indexables en alliage de tungstène et d'un système de refroidissement interne à ultra-haute pression, afin d'éliminer rapidement la majeure partie du matériau excédentaire et d'établir une surface de référence. Les outils de coupe sont en carbure cémenté à grains ultrafins ou en nitrure de bore cubique, et le fluide de coupe est un ester synthétique de qualité médicale, garantissant l'absence de chlore, de soufre ou de phosphore. L'usinage sur un centre d'usinage ultra-précis à cinq axes ou plus utilise des outils de coupe en diamant naturel ou en diamant polycristallin. La profondeur de passe et l'avance sont strictement limitées au micromètre, permettant un formage de haute précision du contour extérieur du réservoir, des ergots de levage, des surfaces étagées labyrinthiques et des trous pré-perçés pour les interfaces fonctionnelles. L'usinage ultra-précis est spécialisé dans les trous borgnes profonds et les cavités internes. Il utilise un procédé « sandwich » combinant perçage profond, rodage par expansion multi-étapes et électropolissage ultrasonique. Le perçage profond garantit la profondeur et la rectitude du trou, le rodage par expansion assure une épaisseur de paroi uniforme et une circularité parfaite, et l'électropolissage ultrasonique élimine les microfissures et les couches de contrainte superficielles, conférant à la surface interne une rugosité miroir. L'usinage final, à finition miroir, couvre toutes les surfaces exposées, notamment les surfaces d'étanchéité des ouvertures de réservoir, les cadres des hublots d'observation et les surfaces de montage des vannes. Ce procédé utilise le polissage magnéto-rhéologique, le polissage par faisceau d'ions ou le polissage chimique assisté par plasma pour garantir une surface exempte de marques d'outils, de couches de détérioration dues au traitement et de contraintes de traction résiduelles.

#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

L'usinage complet est réalisé en salle blanche de classe 100 000 à température et humidité constantes. Des coussinets isolants jetables en tungstène ou en oxyde de zirconium de haute pureté sont utilisés entre la pièce et les outils de coupe et les dispositifs de fixation afin d'éviter tout transfert d'éléments du groupe du fer. Les dimensions critiques sont contrôlées en temps réel à l'aide d'une machine à mesurer tridimensionnelle, d'un tracker laser et d'un profilomètre optique en ligne. L'épaisseur minimale des parois et l'épaisseur du fond des trous sont vérifiées par ultrasons multiéléments et par imagerie gamma. Le produit final subit un contrôle d'étanchéité global par spectrométrie de masse à l'hélium et un contrôle de propreté de surface par fluorescence en salle blanche avant l'application du revêtement fonctionnel.

#### 4.2.4 Procédé de traitement de surface du réservoir de protection en alliage de tungstène

Le traitement de surface est l'ultime étape de transformation qui métamorphose les réservoirs blindés en alliage de tungstène, de simples corps métalliques haute performance en systèmes fonctionnels écologiques et durables. Il doit simultanément conférer au réservoir une résistance à la corrosion et aux rayures extrêmement élevée, une très faible quantité de produits de détachage, de bonnes propriétés esthétiques et une innocuité absolue, même en cas de contact répété. L'absence d'un seul de ces critères suffit à entraîner la mise hors service prématurée du réservoir, en moins de dix ans.

Le système de traitement de surface haut de gamme repose sur une architecture composite à trois couches : « renforcement de la couche inférieure + protection de la couche intermédiaire + couche de surface facile à nettoyer ». Le renforcement de la couche inférieure utilise la nitruration ionique, la boruration ou la cémentation plasma à basse température pour former des nitrures, des borures ou des phases de renforcement en solution solide à haute dureté, à des profondeurs de quelques dizaines à quelques centaines de micromètres à la surface de l'alliage de tungstène, augmentant ainsi significativement la dureté Vickers. Simultanément, une couche de contrainte de compression favorable est préformée en surface, empêchant efficacement l'amorçage et la propagation des microfissures. La protection de la couche intermédiaire repose principalement sur un dépôt chimique en phase vapeur d'alliage nickel-phosphore, dont l'épaisseur et la teneur en phosphore sont contrôlées avec précision et optimisées pour une résistance à la corrosion optimale. Ce dépôt est totalement exempt de porosités et de défauts, et adhère métallurgiquement au substrat. Par la suite, un traitement thermique de diffusion à basse température est réalisé sous vide ou sous atmosphère protectrice, créant une zone de diffusion de transition de quelques dizaines de micromètres de large entre la couche de nickel et le substrat en alliage de tungstène, éliminant ainsi tout risque de décollement du revêtement. Pour certaines applications en médecine nucléaire et pour les réservoirs de déchets, le CrN déposé par PVD est utilisé. Les revêtements en TiN ou en carbone amorphe (DLC) sont sélectionnés avec soin, offrant un équilibre optimal entre dureté extrême et bioinertie. Le revêtement de surface, facilement décontaminisable, utilise des fluoropolymères de qualité médicale, du polyuréthane modifié par silane ou des systèmes composites nano-céramiques. L'adhérence à l'échelle atomique est obtenue par activation plasma suivie d'un dépôt sous vide ou d'une pulvérisation de CO<sub>2</sub> supercritique. Le revêtement présente une énergie de surface extrêmement faible et un angle de contact très élevé, permettant l'adsorption des contaminants radioactifs uniquement par des forces de van der Waals extrêmement faibles. Un simple coup de chiffon humide suffit à lui redonner sa propreté d'origine. Le revêtement lui-même résiste au jaunissement induit par les

#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

radiations, aux détergents oxydants puissants et au vieillissement à la vapeur à haute température, sa durée de vie étant parfaitement équivalente à celle du substrat en alliage de tungstène.

Tous les traitements de surface sont effectués en salle blanche de classe 100 000 ou supérieure, sur une ligne de production automatisée en circuit fermé. Les gaz et liquides résiduels sont recyclés et traités en circuit fermé, éliminant ainsi toute émission de cyanure, de métaux lourds ou de composés organiques volatils. Avant sa sortie d'usine, chaque cuve subit des centaines d'heures de tests de vieillissement composite continus par brouillard salin, brouillard acide et irradiation ultraviolette, ainsi qu'une vérification par essuyage avec des détergents. Seules les cuves exemptes de cloques, de perte de brillance, de prise de poids et de contamination résiduelle sont commercialisées.

#### 4.3 Points clés du contrôle qualité dans le processus de fabrication des boîtiers de protection en alliage de tungstène

de tungstène ont depuis longtemps dépassé le modèle passif traditionnel d'« échantillonnage et contrôle final » pour devenir un système de prévention et de contrôle proactif en boucle fermée, couvrant l'intégralité du processus, tous les éléments, tout le personnel et tous les enregistrements. Son principe fondamental est d'empêcher toute répercussion, même minime, sur le processus, les paramètres ou l'opérateur, et encore moins sa transmission à l'étape suivante, et a fortiori sur les utilisateurs de la chambre chaude dix ans plus tard.

Le contrôle qualité est rigoureux dès l'entrée des matières premières dans l'usine. Chaque lot de poudre de tungstène, de liant et de matériaux auxiliaires est soumis à quatre tests indépendants : spectrométrie de masse à décharge lumineuse, fusion sous gaz inerte, analyse granulométrique laser et MEB-EDS. Les rapports de test correspondent exactement au lot et sont archivés en permanence ; toute anomalie entraîne le retour du lot entier. Tous les procédés clés, notamment le mélange, le pressage, le frittage, l'usinage et le traitement de surface, sont soumis à un contrôle statistique des procédés (SPC). Des centaines de paramètres essentiels, tels que la température, la pression, le temps, la vitesse de rotation et la profondeur de passe, sont collectés, signalés et enregistrés en temps réel. Les fours de frittage, les presses isostatiques à chaud et les centres d'usinage de trous profonds sont tous équipés d'enregistreurs de données de haute précision, permettant une reproduction exacte des anomalies à la seconde près.

Des contrôles non destructifs sont effectués tout au long du processus : la billette pressée est inspectée par tomographie industrielle afin de détecter les fissures internes et d'évaluer la répartition de sa densité ; après frittage, elle fait l'objet d'une double vérification par ultrasons multiéléments et imagerie gamma ; après traitement, le taux de détection des fuites par spectrométrie de masse à l'hélium du réservoir doit être conforme aux normes de vide ; après traitement de surface, des contrôles par ressuage fluorescent, par rayons X des contraintes résiduelles et par mesure de l'angle de contact sont réalisés pour chaque élément. Les dimensions critiques (épaisseur minimale de paroi, épaisseur du fond des trous, planéité de la surface d'étanchéité, jeu du labyrinthe) sont mesurées indépendamment par une machine à mesurer tridimensionnelle, un tracker laser et un profilomètre optique en ligne, et les résultats doivent être parfaitement cohérents avant de passer à l'étape suivante.

#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT



Les mesures les plus rigoureuses concernent la traçabilité et la responsabilité. Du premier gramme de poudre de tungstène au revêtement final, tous les paramètres de processus, les opérateurs, les rapports de tests, les numéros d'équipement, ainsi que la température et l'humidité ambiantes de chaque cuve de protection sont enregistrés dans un code QR unique et une archive électronique de type blockchain. Tout problème, quelle que soit sa nature, peut être retracé jusqu'à la personne responsable en quelques secondes. Avant de quitter l'usine, chaque cuve doit subir un étalonnage par irradiation à source réelle, simulant les conditions les plus défavorables avec du cobalt-60 ou du césium-137. Ce n'est qu'après validation du débit de dose en surface externe, de la distribution des angles de fuite et du niveau de rayonnement secondaire que la cuve peut être marquée du sceau « garantie de responsabilité à vie ».

#### 4.3.1 Normes et méthodes d'inspection à réception des réservoirs de protection en alliage de tungstène

Le contrôle par cuves de protection en alliage de tungstène est la première étape, la plus rigoureuse et la plus inflexible, du processus de contrôle qualité. Si un seul indicateur, quel que soit le lot de poudre, dépasse la limite autorisée, le lot entier est renvoyé à l'étape de production de poudre minérale, sans aucune possibilité de négociation.

Le contrôle à réception est divisé en quatre modules principaux : pureté chimique, propriétés physiques, pureté radioactive et homogénéité des lots. Tous les tests sont réalisés simultanément dans un laboratoire tiers indépendant et dans les laboratoires internes de l'entreprise. Les tests de pureté chimique utilisent la spectrométrie de masse à décharge lumineuse (GFMS) avec analyse élémentaire complète, la fusion sous gaz inerte couplée à la conductivité thermique infrarouge (IR-TIR) pour la détermination de l'oxygène, du carbone et du soufre, et la spectrométrie de masse à plasma à couplage inductif (ICP-MS) pour les impuretés métalliques et non métalliques. La teneur totale en impuretés de la poudre de tungstène doit être nettement inférieure à la limite supérieure conventionnelle du secteur, et la teneur individuelle des principaux éléments nocifs tels que le molybdène, le niobium, le tantale, le titane, le potassium, le sodium, le phosphore et le soufre doit être maintenue à des niveaux extrêmement bas. Les poudres de nickel, de fer et de cuivre sont soumises aux mêmes normes, et la présence d'éléments tels que le cobalt, l'arsenic, le bismuth et le tellure, qui ont un impact fatal sur la résistance à la corrosion et les produits d'activation, est strictement interdite. Les essais de propriétés physiques comprennent la granulométrie par la méthode de Fisher, la granulométrie par diffraction laser, la densité apparente (méthode Scott), la densité tassée, la morphologie par microscopie électronique à balayage (MEB) et la surface spécifique (méthode BET). Les poudres de tungstène et de liant doivent être quasi sphériques, avec une granulométrie extrêmement fine, sans particules satellites, sans agglomérats et sans vides internes. La pureté radioactive a été vérifiée par spectrométrie gamma au germanium de haute pureté, avec analyse du spectre complet, afin de confirmer les niveaux de fond des radionucléides naturels et artificiels tels que le thorium, l'uranium, le plutonium, l'américium et le cobalt-60. L'homogénéité des lots a été contrôlée par des essais rapides sur de petits échantillons (mélange, pressage, frittage, densité, dureté et métallographie) afin de garantir que les nouveaux lots de poudre soient parfaitement équivalents aux lots de référence validés en termes de microstructure et de propriétés.

#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

Tous les spectres bruts, les données brutes, les enregistrements d'étalonnage des instruments et les échantillons physiques doivent être archivés de manière permanente et téléchargés sur le système de qualité blockchain de l'entreprise.

#### 4.3.2 Points de contrôle qualité dans les processus intermédiaires des réservoirs de protection en alliage de tungstène

Les nœuds d'inspection de la qualité des processus intermédiaires sont conçus comme un réseau d'interception complet, comportant plusieurs niveaux de points de contrôle et de mécanismes de verrouillage. En cas de défaillance d'un processus, le processus en aval est immédiatement déconnecté physiquement et la pièce défectueuse n'accédera jamais à la station suivante.

Les nœuds clés comprennent :

- Après mélange, plusieurs échantillons ont été prélevés pour une nouvelle mesure de la taille des particules par laser et une chromatographie de composition SEM-EDS afin de confirmer l'uniformité microscopique de la phase tungstène-liant.
- La billette pressée est démoulée, puis soumise à une tomographie industrielle tridimensionnelle de densité et à un contrôle ultrasonore global des défauts. Toute zone présentant une densité inférieure au seuil ou des fissures internes est immédiatement mise au rebut.
- Après frittage, les ébauches sont d'abord soumises à une spectrométrie de masse à l'hélium pour la détection globale des fuites et la confirmation de l'absence de défauts traversants. Ensuite, une imagerie de densité par transmission gamma et un balayage couche par couche par ultrasons multiéléments sont effectués pour garantir l'homogénéité de la densité entre le cœur et la surface, ainsi que l'absence de pores fermés ou de zones de ségrégation.
- Après l'ébauche, une première mesure d'épaisseur par ultrasons et un relevé dimensionnel par machine à mesurer tridimensionnelle sont effectués afin d'établir une référence permanente.
- Une fois le trou borgne profond usiné, un endoscope et un scanner laser de contour sont utilisés pour vérifier le rayon de fond et la qualité de surface du trou. Simultanément, une seconde mesure d'épaisseur par ultrasons est effectuée afin de confirmer l'épaisseur minimale de la paroi.
- Une fois chaque sous-couche de traitement de surface terminée, un test d'adhérence par quadrillage, une mesure d'épaisseur par courants de Foucault, un test de pré-corrosion au brouillard salin et une mesure de l'angle de contact sont effectués pour garantir que chaque couche est qualifiée indépendamment.

#### 4.3.3 Processus d'inspection complet des boîtes de protection en alliage de tungstène finies avant expédition

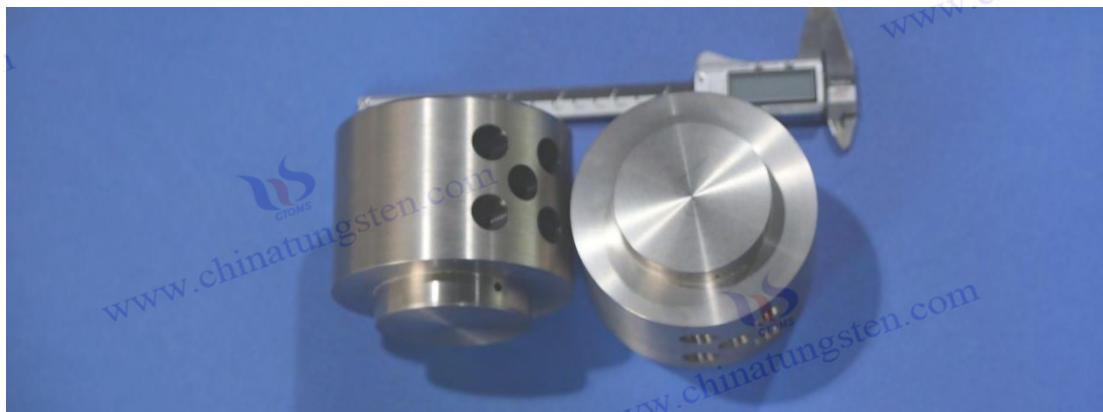
L'inspection finale des produits finis avant leur sortie d'usine constitue la dernière étape de validation, apposant le « certificat de naissance » du conteneur blindé en alliage de tungstène, et représente le jugement final le plus rigoureux de toute la chaîne de fabrication. Seuls les conteneurs ayant passé avec succès ce processus sont autorisés à être conditionnés dans des caisses de transport antichoc spéciales,

#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

estampillées d'un marquage de responsabilité à vie, et livrés aux centres de médecine nucléaire les plus exigeants ou aux installations de stockage de déchets les plus strictes.

Le processus est divisé en cinq sections principales : propriétés géométriques et mécaniques, performances de blindage, performances d'étanchéité et de confinement, performances de surface et environnementales, et conformité réglementaire et étiquetage. Toutes ces étapes sont réalisées dans une salle blanche indépendante et une salle d'étalonnage de source de cobalt-60/césium-137. La section relative aux performances géométriques et mécaniques comprend la numérisation par machine à mesurer tridimensionnelle (MMT), la mesure de l'épaisseur minimale des parois par ultrasons, la mesure de la planéité et de la rugosité de la surface d'étanchéité par profilomètre optique, ainsi que des essais de traction statique sur les anneaux et les brides de levage. La section relative aux performances de blindage utilise des sources standard de cobalt-60 ou de césium-137 pour effectuer une numérisation panoramique du débit de dose en surface externe, la mesure de la distribution des angles de fuite et l'analyse du spectre de rayonnement secondaire à différentes distances source-conteneur. Le débit de dose en tout point doit être largement inférieur aux limites réglementaires et exempt de points chauds directionnels. La section relative à l'étanchéité et au confinement effectue une détection de fuites par spectrométrie de masse à l'hélium, sous vide et pressurisation, suivie d'une réinspection après 100 000 cycles d'ouverture et de fermeture du couvercle, ainsi que des contrôles d'intégrité après simulation d'une chute de neuf mètres et d'un incendie. La section relative aux performances de surface et environnementales comprend des tests de vieillissement composite par brouillard salin, brouillard acide et irradiation ultraviolette, des tests d'essuyage répétés avec de véritables détergents et la vérification de la facilité d'essuyage des contaminants de surface. La section relative à la réglementation et à l'étiquetage vérifie les certificats REACH et RoHS, les certificats d'homologation des conteneurs de transport, les codes d'identification uniques gravés au laser et les systèmes de traçabilité par code QR.

Tous les tests sont réalisés conjointement par un organisme tiers qualifié et le personnel interne de l'entreprise. Les rapports originaux, les vidéos des tests et les enregistrements des produits sources sont scellés et archivés. Enfin, l'ingénieur en chef, le directeur qualité et le signataire tiers autorisé délivrent conjointement le « Certificat de naissance et garantie de qualité à vie pour le boîtier de blindage en alliage de tungstène », et toutes les données sont enregistrées dans la puce RFID résistante aux radiations intégrée au boîtier.



CTIA GROUP LTD Boîtier de blindage en alliage de tungstène

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

## CTIA GROUP LTD

### High-Density Tungsten Alloy Customization Service

CTIA GROUP LTD, a customization expert in high-density tungsten alloy design and production with 30 years of experience.

**Core advantages:** 30 years of experience: deeply familiar with tungsten alloy production, mature technology.

**Precision customization:** support high density (17-19 g/cm<sup>3</sup>), special performance, complex structure, super large and very small parts design and production.

**Quality cost:** optimized design, optimal mold and processing mode, excellent cost performance.

**Advanced capabilities:** advanced production equipment, RMI, ISO 9001 certification.

#### 100,000+ customers

Widely involved, covering aerospace, military industry, medical equipment, energy industry, sports and entertainment and other fields.

#### Service commitment

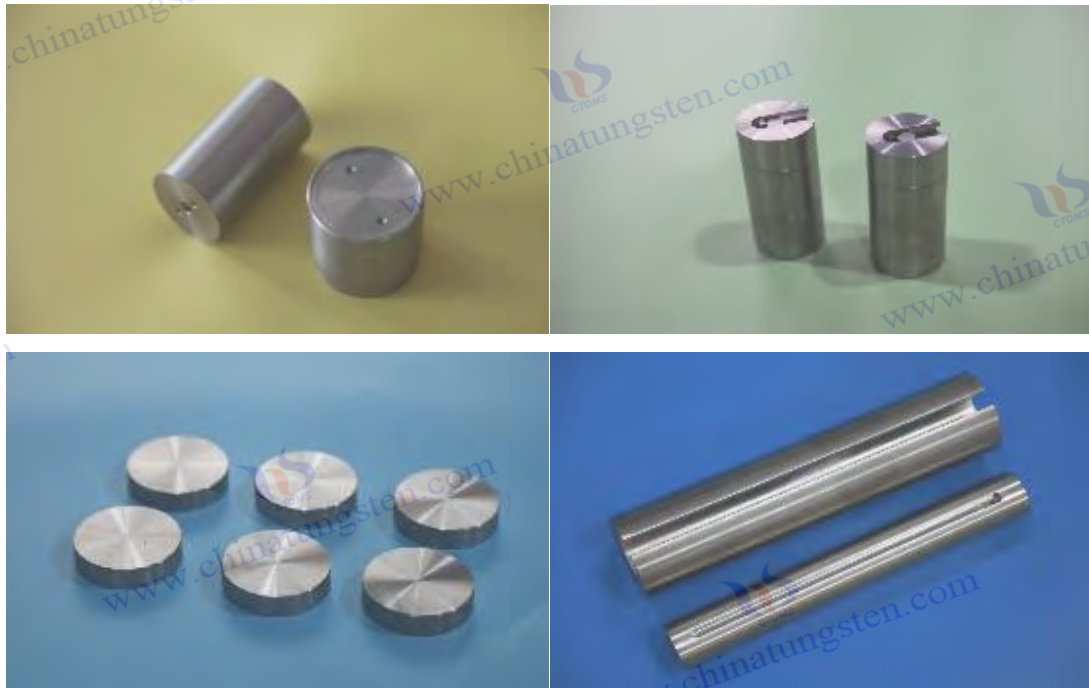
1 billion+ visits to the official website, 1 million+ web pages, 100,000+ customers, 0 complaints in 30 years!

Contact us

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

Tel: +86 592 5129696

Official website: [www.tungsten-alloy.com](http://www.tungsten-alloy.com)



#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

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

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



## Chapitre 5 Domaines d'application des boîtiers de protection en alliage de tungstène

### 5.1 Application des boîtiers de protection en alliage de tungstène dans l'industrie nucléaire

Les conteneurs de blindage en alliage de tungstène sont largement utilisés dans l'industrie nucléaire, couvrant tous les aspects clés, du stockage intermédiaire du combustible usé au démantèlement des installations, en passant par le traitement des déchets radioactifs et la production d'isotopes. Leur efficacité de blindage volumétrique élevée, leurs excellentes propriétés mécaniques, leur forte inertie chimique et leur recyclabilité totale leur ont permis de remplacer progressivement les conteneurs composites plomb-acier traditionnels et les structures de blindage en béton armé. Ils sont ainsi devenus une technologie essentielle pour minimiser les déchets, optimiser l'exposition du personnel et garantir une élimination finale respectueuse de l'environnement.

#### 5.1.1 Réservoir blindé en alliage de tungstène pour le stockage et le transfert du combustible usé

Le flux neutronique élevé et la chaleur résiduelle importante générée après le retrait des assemblages de combustible usé du réacteur exigent que les conteneurs de stockage et de transfert présentent un blindage extrêmement performant et une fiabilité de confinement à long terme, tout en respectant des contraintes de poids et d'encombrement limitées. Les conteneurs blindés en alliage de tungstène, dont la densité dépasse largement celle du plomb et l'efficacité volumétrique bien supérieure à celle du béton, sont devenus la solution privilégiée pour les réservoirs de stockage à eau, les cylindres de stockage à sec et les conteneurs de transfert inter-centrales/inter-sites.

Les réservoirs en alliage de tungstène pour le stockage d'eau utilisent un système tungstène-nickel-fer à haute teneur en tungstène, associé à une couche absorbant les neutrons composite à base de borure ou d'hydrogène, assurant ainsi une protection combinée contre les rayonnements gamma et neutroniques. Un revêtement résistant aux chlorures est appliqué sur la surface extérieure du réservoir, permettant un fonctionnement durable en milieu aqueux acide borique sans piqûres ni fragilisation par l'hydrogène. Le cylindre vertical de stockage à sec est principalement constitué d'un alliage de tungstène quasi-fini, rempli d'hélium, doté d'une bague intérieure en cuivre thermoconductrice et d'un système de surveillance multipoints de la température et du dosage, garantissant un stockage sûr pendant des décennies en conditions anhydres et sans entretien. Les conteneurs de transport sont strictement conformes aux normes IAEA SSR-6 et TS-R-1 et utilisent une structure à double paroi en alliage de tungstène, un revêtement intérieur absorbant les chocs et thermoconducteur, et une enveloppe extérieure résistante au feu. Ils ont subi des tests de chute de neuf mètres, de flamme à 800 degrés Celsius pendant 30 minutes et d'immersion, démontrant ainsi leur capacité à maintenir une étanchéité et une protection complètes dans les conditions d'accident de transport les plus exigeantes.

#### 5.1.2 Conteneurs blindés en alliage de tungstène pour le traitement des déchets radioactifs

Les procédés de traitement des déchets radioactifs comprennent de multiples opérations très polluantes telles que le tri, la compression, la solidification, le conditionnement et le stockage temporaire. Ils exigent des conteneurs de blindage capables de s'ouvrir et de se fermer à haute fréquence, de décontaminer en

#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT



profondeur, d'être assemblés de manière modulaire et de permettre un confinement permanent. Grâce à leur excellent rapport résistance/ténacité, leur coefficient d'adhérence des contaminants de surface extrêmement faible et leurs caractéristiques totalement non toxiques et recyclables, les conteneurs de blindage en alliage de tungstène sont devenus le seul matériau utilisé tout au long du processus de traitement des déchets.

Lors des opérations de tri et de réduction de volume en chambre chaude, de grands conteneurs blindés fixes en alliage de tungstène sont équipés de couvercles à ouverture rapide hydraulique, de revêtements sacrificiels remplaçables en acier inoxydable et de systèmes de décontamination par jet d'eau haute pression. Ces systèmes garantissent la propreté du conteneur tout en traitant en continu de grandes quantités de déchets solides radioactifs de faible et moyenne activité. Pour les étapes d'évaporation et de vitrification des déchets radioactifs de haute activité, des conteneurs en tungstène-nickel-cuivre ultra-résistants à la corrosion sont utilisés, revêtus de couches composites de céramique haute température ou de tantale. Ces conteneurs résistent à la corrosion combinée de l'acide nitrique concentré, du verre en fusion et des détergents oxydants puissants, évitant ainsi qu'ils ne deviennent une source secondaire de contamination. Pour les étapes finales de conditionnement et de stockage à long terme, des conteneurs à déchets en alliage de tungstène à fermeture permanente ou des conteneurs à déchets en alliage de tungstène à couvercles multiples redondants sont utilisés. Ces conteneurs enferment de façon permanente le corps vitrifié ou le gâteau de déchets surcompacté dans une enveloppe en alliage de tungstène haute densité, non corrosive et sans produit activateur. La surface est revêtue de plusieurs couches de polyurée résistante au vieillissement, permettant un stockage sûr pendant des centaines d'années sans intervention humaine, jusqu'à son transfert vers un site de stockage géologique.

tungstène dans le traitement des déchets permet non seulement de réduire considérablement la dose cumulée reçue par les opérateurs et le volume de déchets secondaires, mais aussi d'assurer une élimination finale plus respectueuse de l'environnement des emballages de déchets au niveau des matériaux. Entièrement refondables et réutilisables, ces conteneurs peuvent être réintégrés directement dans la chaîne de production de tungstène sans passer par le processus d'élimination des déchets dangereux, répondant ainsi aux exigences techniques les plus strictes en matière de réduction des déchets tout au long du cycle de vie de l'industrie nucléaire.

### **5.1.3 Conteneur de blindage en alliage de tungstène pour échantillons d'exploration géologique nucléaire**

L'exploration géologique nucléaire (exploration de l'uranium et du thorium, cartographie des zones de minéralisation radioactive, carottage et diagraphie gamma in situ) exige le confinement et le transport rapides, sûrs et exempts de contamination sur site d'échantillons hautement réactifs (carottes, minerais et sols) contenant des radionucléides naturels des séries de l'uranium et du thorium, ainsi que du potassium-40, dans des conditions géologiques et climatiques complexes. Les conteneurs en plomb traditionnels et les combinaisons de sacs plastiques et de plaques de plomb ne répondent plus aux exigences techniques de haute précision et de haute efficacité de l'exploration géologique nucléaire moderne, en raison de leur poids, de leur sensibilité à la contamination, de la difficulté de leur décontamination et de leur dégradation due au vieillissement sous des conditions de température et d'humidité élevées. Les conteneurs blindés

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

en alliage de tungstène, légers, résistants, insensibles aux intempéries et entièrement décontaminables et recyclables, sont devenus la norme pour les conteneurs d'échantillons dédiés à l'exploration géologique nucléaire.

Le conteneur spécialisé pour échantillons d'exploration utilise un système non magnétique résistant à la corrosion en tungstène-nickel-cuivre. L'épaisseur de la paroi est précisément dimensionnée selon des gradients basés sur la teneur maximale attendue en uranium-thorium et l'activité du potassium-40 de l'échantillon de carotte. Généralement, tout en garantissant un débit de dose en surface externe 2 à 3 fois inférieur au rayonnement de fond, le poids total du conteneur est maintenu dans une plage facilement manipulable par une seule personne. Sa structure comprend principalement un bouchon à vis à ouverture rapide avec double joint en fluoroélastomère. Le bouchon et le corps du conteneur forment une double barrière de sécurité grâce à un contact métal-métal rigide et un joint souple, le tout grâce à une structure conique auto-centrante de haute précision. Ceci garantit une étanchéité parfaite, même après un transport mouvementé et des ouvertures et fermetures fréquentes. La paroi intérieure du conteneur est entièrement polie miroir et revêtue d'un revêtement fluoré facile à nettoyer. La surface extérieure utilise un revêtement élastique en polyurée vert militaire ou beige, capable de résister à l'érosion à long terme due aux températures élevées du désert, aux basses températures des sols gelés, aux pluies acides et aux sols salins-alcalins sans cloquer ni se désagréger.

Les applications typiques comprennent :

- Le conteneur de protection standard en alliage de tungstène spécifique au noyau de 63 à 108 mm peut être inséré directement dans l'extrémité du tube de carottage du forage et retiré avec le noyau, réalisant une opération en une seule étape de « carottage et d'encapsulation ».
- Conteneur portable pour échantillons de sol et de minéraux, équipé d'un affichage intégré du débit de dose et d'une puce de positionnement GPS, peut enregistrer le point d'échantillonnage et le niveau de rayonnement en temps réel ;
- Le boîtier de blindage multitubes en alliage de tungstène monté sur véhicule peut contenir simultanément des dizaines de carottes de roche et maintenir un blindage stable et une absorption des chocs sur les véhicules tout-terrain.

tungstène ne permettent au personnel d'exploration géologique nucléaire d'effectuer des prélèvements propres dans les zones minières à forte radioactivité naturelle, sans contamination cutanée, sans diffusion d'aérosols et sans interférence entre les échantillons. Ils améliorent considérablement la représentativité des échantillons et la précision des mesures, tout en réduisant fortement la dose de rayonnement cumulée reçue par les travailleurs sur le terrain.

#### 5.1.4 Conteneurs de blindage en alliage de tungstène pour équipements auxiliaires de réacteurs nucléaires

Les milieux radioactifs hautement actifs, corrosifs, à haute température et haute pression sont omniprésents dans les systèmes auxiliaires du circuit primaire, les systèmes d'échantillonnage, les systèmes de traitement des effluents liquides et les canalisations de surveillance de l'irradiation des

##### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

réacteurs nucléaires. Il est donc impératif que les conteneurs de protection garantissent un confinement fiable à long terme, un échantillonnage précis et un fonctionnement sans maintenance dans l'enceinte confinée du réacteur et sous un environnement de forte irradiation. Les conteneurs de protection en alliage de tungstène, grâce à leur rapport densité/résistance extrêmement élevé, leur excellente résistance à la corrosion et leur stabilité sous irradiation à haute température, sont devenus les composants de blindage et de confinement les plus critiques des équipements auxiliaires des réacteurs.

Les applications typiques comprennent les quatre principales catégories suivantes :

1. Des conteneurs blindés en alliage de tungstène sont utilisés pour l'échantillonnage du fluide caloporteur primaire, de la solution d'acide borique et des gaz d'échappement. Les pressions de service peuvent atteindre 15 à 20 MPa et la plage de températures couvre l'arrêt à froid jusqu'au fonctionnement à pleine puissance. Le corps du conteneur est fabriqué en alliage tungstène-nickel-fer haute résistance, avec un revêtement intérieur en alliage de tantale ou de zirconium. Un revêtement anti-oxydation haute température est appliqué sur la surface extérieure, lui permettant de résister pendant des décennies à l'environnement de flux neutronique extrêmement élevé de la cavité du réacteur, sans gonflement, fragilisation ni perforation par corrosion. Au niveau du passage de la conduite d'échantillonnage à travers la paroi blindée du réacteur, un manchon de blindage coaxial emboîté en alliage de tungstène assure un blindage localisé pendant l'échantillonnage.
2. Les échantillons de contrôle contenus dans les tubes de surveillance d'irradiation et les conteneurs de confinement, notamment les tubes de surveillance du flux neutronique du réacteur et les tubes de surveillance de l'irradiation des matériaux, doivent rester en position fixe et parfaitement confinés pendant toute leur durée de vie. Le conteneur de blindage en alliage de tungstène est directement intégré au canal d'instrumentation du cœur sous la forme d'un tube à paroi épaisse. Sa cavité interne est usinée avec précision et présente une structure multicompartimentée, capable de contenir simultanément des dizaines d'échantillons de contrôle de matériaux différents. Le corps du conteneur utilise un système tungstène-nickel-fer à faible activation, garantissant ainsi la production de niveaux extrêmement faibles de produits d'activation à longue durée de vie après une irradiation neutronique à haut flux, et n'interférant donc pas avec les mesures ultérieures du spectre gamma des échantillons de contrôle.
3. Les réservoirs de stockage des déchets liquides et résineux, générés par le système de contrôle de la chimie et de la capacité du réacteur, contiennent des déchets hautement radioactifs, notamment du tritium, du cobalt-60 et de l'antimoine-125. Ces déchets nécessitent un stockage temporaire et leur désintégration se produit à proximité de la cavité du réacteur. Les réservoirs blindés en alliage de tungstène utilisent un alliage tungstène-nickel-cuivre ultra-résistant à la corrosion, avec un revêtement en Hastelloy. Dotés d'un système d'isolation et d'équilibrage de pression à double vanne, ils résistent aux acides et bases forts, ainsi qu'aux environnements à haute température et forte humidité, pendant des décennies sans corrosion par piqûres ni fissuration sous contrainte.
4. Lors de réparations ou de révisions majeures de corps de collimateurs, notamment pour le remplacement d'inserts de blindage localisé, il est nécessaire d'insérer des composants de blindage localisé temporaires dans les zones à forte irradiation afin de réduire le débit de dose

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

dans certaines directions. Les alliages de tungstène, sous forme d'inserts détachables, de cylindres emboîtés ou de collimateurs rotatifs, offrent une solution de blindage localisé plus efficace, plus légère et plus résistante aux hautes températures que le plomb, grâce à un revêtement de surface dur qui résiste aux étincelles de découpe et aux projections de soudure.

Les conteneurs de blindage en alliage de tungstène susmentionnés dans les équipements auxiliaires du réacteur permettent non seulement de réduire considérablement l'épaisseur et le poids globaux du blindage de la cavité du réacteur et des bâtiments auxiliaires, mais aussi de réduire considérablement la quantité de travaux de maintenance pendant le fonctionnement et le nombre de personnes exposées aux radiations lors des révisions en raison de la faible activation et de la grande stabilité du matériau.

## **5.2 Application des conteneurs de protection en alliage de tungstène dans le domaine médical et de la santé**

Les conteneurs de blindage en alliage de tungstène sont largement utilisés dans le domaine médical et paramédical, couvrant tous les aspects essentiels du diagnostic en médecine nucléaire, de la production de produits radiopharmaceutiques, de la radiothérapie des tumeurs et de la radiologie interventionnelle. Leurs propriétés non magnétiques, haute densité, bioinertes, de surface facilement décontaminable, totalement non toxiques et recyclables en font le seul système de blindage répondant simultanément aux exigences des salles d'IRM, des salles blanches BPF, des réglementations en radioprotection médicale et aux besoins économiques à long terme des hôpitaux.

### **5.2.1 Conteneurs blindés en alliage de tungstène pour le stockage et le transfert de produits radiopharmaceutiques**

Les produits radiopharmaceutiques (tels que le fluor-18 FDG, le technétium-99m, l'iode-131, le lutétium-177 et l'actinium-225) se caractérisent par une courte demi-vie, une activité élevée, des formes chimiques complexes et la nécessité d'une distribution et d'un transport fréquents. Ceci exige des conteneurs de blindage assurant une protection gamma très efficace dans un volume et un poids extrêmement réduits, tout en étant compatibles avec les salles blanches, faciles à manipuler par une seule personne et garantissant une décontamination de surface rigoureuse. Les conteneurs de blindage en alliage de tungstène, basés sur un système non magnétique et résistant à la corrosion en tungstène-nickel-cuivre, ont complètement remplacé les conteneurs traditionnels en verre et en plomb, devenant ainsi la norme pour l'ensemble de la chaîne d'approvisionnement des produits radiopharmaceutiques, de la production à l'injection.

Les produits typiques comprennent :

- Le conteneur blindé intégré du générateur de molybdène -99/technétium-99m adopte une épaisseur de paroi graduelle + une fenêtre d'observation en verre au plomb intégrée + une structure de bouchon à vis à ouverture rapide, ce qui permet le remplacement rapide du générateur et l'élution en ligne dans une chambre chaude GMP ;

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

- Le manchon de protection pour seringue et distributeur de FDG pèse seulement un tiers à la moitié du poids d'un manchon en plomb, tout en offrant une protection équivalente . Il est doté d'un bouchon à ouverture rapide actionnable d'un seul doigt et d'une doublure stérile jetable, permettant ainsi aux infirmières d'effectuer toutes les manipulations d'une seule main dans la salle de distribution ou la salle d'injection PET-CT.
- Le conteneur de transport de dose thérapeutique d'iode-131 et de lutétium-177 est doté d'un double couvercle, d'une valve d'équilibrage de pression et d'un écran d'affichage du débit de dose intégré, ce qui permet de le transporter directement dans les services ou les salles d'opération interventionnelles.
- Le conteneur de transport de médicaments à compartiments multiples est constitué d'une coque extérieure monobloc en alliage de tungstène et de plusieurs petits réservoirs indépendants intégrés. Associé à une mousse antichoc et à un module de contrôle de la température, il permet un transport sécurisé entre hôpitaux ou villes.

L'ensemble de la surface est recouvert de verre poli miroir et d'un revêtement fluoré de qualité médicale, facilement amovible. Il peut être nettoyé ou désinfecté à plusieurs reprises avec une solution d'hypochlorite de sodium à 10 %, d'éthanol à 70 % ou de vapeurs de peroxyde d'hydrogène sans altérer son éclat, et le taux d'élimination des contaminants reste constamment supérieur à 99,99 %. L'utilisation de conteneurs blindés en alliage de tungstène réduit considérablement la dose de rayonnement reçue par les mains et le corps entier du personnel des services de médecine nucléaire, tout en améliorant significativement l'efficacité de la distribution des médicaments et le niveau d'asepsie.

### 5.2.2 Conteneur de blindage en alliage de tungstène pour sources de radiothérapie

Les sources scellées de haute activité utilisées en radiothérapie (telles que les sources de cobalt-60, d'iridium-192 et d'iode-125, les applicateurs de strontium-90 et les microsphères de lutétium-177), ainsi que les chambres d'injection et les systèmes de collimation des appareils de radiothérapie à chargement différé , Gamma Knife et CyberKnife, nécessitent des conteneurs de blindage offrant une efficacité de blindage extrêmement élevée, un contrôle précis des fuites directionnelles, une stabilité géométrique à long terme et des caractéristiques non magnétiques et légères au chevet du patient. Les conteneurs de blindage en alliage de tungstène sont devenus un composant essentiel et irremplaçable de ces équipements.

Les applications typiques comprennent :

- La source de traitement au cobalt-60 et le réservoir de source de traitement à chargement différé adoptent un système tungstène-nickel-fer à haute teneur en tungstène et une structure de collimation imbriquée multicouche, ce qui permet de réduire le débit de dose dans les directions non traitées au niveau du bruit de fond, tout en maintenant une transmittance élevée dans la direction du faisceau de traitement ;
- Le conteneur de stockage et de transport pour l'implantation de grains d'iode-125 est équipé d'une fenêtre d'observation en verre au plomb transparent et d'une plaque magnétique de

#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT



disposition des grains, permettant aux médecins de réaliser directement et visuellement le remplissage des grains dans des conditions stériles.

- Le système de collimateurs en alliage de tungstène des radiochirurgiens Gamma Knife et CyberKnife est composé de centaines de collimateurs en alliage de tungstène de différentes ouvertures, disposés en matrice. La précision de l'ouverture et de la position est contrôlée au micromètre près, garantissant ainsi une erreur de distribution de dose au foyer de traitement inférieure à 1 %.
- Le pansement ophtalmique au strontium-90 et le conteneur de traitement aux microsphères de lutétium-177 adoptent un alliage de tungstène à parois ultra-minces avec une conception d'épaississement local, ce qui assure un dosage élevé sur la surface de traitement tout en minimisant les fuites sur les surfaces non traitées.

Tous les conteneurs de blindage en alliage de tungstène utilisés pour les sources thérapeutiques doivent être homologués comme dispositifs médicaux et soumis aux essais de type réalisés par l'Agence nationale des produits médicaux (ANSM). Leur surface est revêtue de DLC ou de TiN biocompatible et ils résistent à la stérilisation par oxyde d'éthylène, plasma ou vapeur haute température et haute pression sans dégradation. L'utilisation généralisée des conteneurs de blindage en alliage de tungstène a permis d'atteindre des niveaux de précision et de sécurité de positionnement sans précédent pour la curiethérapie à haut débit de dose et la radiothérapie stéréotaxique. Parallèlement, elle a totalement éliminé les problèmes de compatibilité magnétique des blindages en plomb traditionnels utilisés en radiothérapie guidée par IRM, offrant ainsi la base matérielle la plus fiable pour la radiothérapie de précision moderne.

### 5.2.3 Boîtiers de protection en alliage de tungstène pour équipements d'imagerie médicale

Les équipements d'imagerie médicale (TEP-TDM, TEMP-TDM, TEP-IRM, systèmes d'auto-blindage pour cyclotrons, accélérateurs linéaires médicaux) imposent des exigences élevées aux composants de blindage local : densité élevée, propriétés amagnétiques, haute précision, intégrabilité et stabilité géométrique à long terme. Les conteneurs de blindage en alliage de tungstène et leurs dérivés sont largement utilisés dans des domaines clés de ces dispositifs, tels que la collimation des détecteurs, le confinement du faisceau de rayons X, le stockage des sources de rayonnement et la suppression du rayonnement de fond.

Les anneaux détecteurs PET-CT et SPECT-CT utilisent généralement des collimateurs en alliage de tungstène de haute pureté, constitués avec précision de dizaines de milliers de feuilles d'alliage de tungstène d'une épaisseur de 0,1 à 0,3 mm et d'une précision micrométrique au niveau de l'ouverture et de l'espacement. Ceci permet d'obtenir une résolution spatiale extrêmement élevée et une suppression de la diffusion pour les photons d'annihilation de 511 keV et les rayons gamma de 140 keV. Le système non magnétique en tungstène-nickel-cuivre garantit l'absence de couple ou d'artefacts d'image sous des champs magnétiques intenses supérieurs à 3 T. La chambre cible auto-blindée et la ligne de faisceau du cyclotron utilisent une structure composite multicouche en alliage de tungstène et polyéthylène contenant du bore, atténuant les rayons gamma et les neutrons de haute énergie générés par les protons de 18 MeV jusqu'à des niveaux comparables au bruit de fond extérieur à la salle des machines en un seul passage, éliminant ainsi les coûts considérables de génie civil liés aux salles des machines traditionnelles en béton,

#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

de type labyrinthe. Le système de collimation de la tête de traitement de l'accélérateur linéaire médical utilise des réseaux multilames en alliage de tungstène et des blocs de collimation secondaires, offrant une précision et une répétabilité de positionnement de chaque lame supérieures à 0,1 mm. Le revêtement DLC de surface résiste à des centaines de milliers de mouvements à grande vitesse sans usure. L'intégration de boîtiers de blindage en alliage de tungstène a permis aux équipements d'imagerie médicale haut de gamme de bénéficier d'un encombrement réduit, d'un bruit de fond plus faible, d'un temps d'acquisition plus court et d'une précision diagnostique accrue. Ce système est devenu un élément matériel indispensable à l'imagerie moléculaire moderne et à la radiothérapie de précision.

#### 5.2.4 Conteneurs blindés en alliage de tungstène pour le stockage temporaire de déchets radioactifs

Le service de médecine nucléaire, le laboratoire de cathétérisme interventionnel et le service de radiothérapie de l'hôpital produisent quotidiennement d'importantes quantités de déchets à courte période radioactive (seringues, perfuseurs, gants, pansements, excréments d'iode-131, résidus de traitement au lutétium-177, etc.). Ces déchets doivent être stockés temporairement au sein des services afin de permettre leur décroissance radioactive en toute sécurité jusqu'à ce que leur activité atteigne des niveaux exemptés. Les conteneurs blindés en alliage de tungstène, grâce à leur légèreté, leur facilité de nettoyage, leur longue durée de vie, leur esthétique et leur non-toxicité, ont complètement remplacé les conteneurs traditionnels en plomb et en acier, devenant ainsi le conteneur de choix pour le stockage temporaire des déchets radioactifs dans les hôpitaux.

Les produits typiques comprennent :

- Conteneur à déchets de chevet : volume de 10 à 30 L, avec couvercle à ouverture rapide par pédale et doublure intérieure en polymère jetable, permettant aux infirmières d'éliminer les déchets d'un seul pied.
- Réservoir de décomposition centralisé du département : 50–200 L, avec une structure à double couvercle + filtre à charbon actif + vanne d'équilibrage de pression, qui peut contenir simultanément les déchets solides et liquides et adsorber l'iode volatil ;
- Réservoir de liquide pour déchets thérapeutiques au lutétium-177/acétium-225 : système en tungstène-nickel-cuivre ultra-résistant à la corrosion + orifice de vidange à double vanne, peut résister à l'immersion dans un liquide de déchets thérapeutiques fortement acide pendant plusieurs mois sans corrosion ;
- Armoires à déchets murales et sous comptoir : La combinaison d'une coque en alliage de tungstène et d'une doublure intérieure en acier inoxydable s'intègre parfaitement au décor des salles blanches et des laboratoires de cathétérisme.

Tous les conteneurs de stockage des déchets sont revêtus d'un revêtement antibactérien de qualité médicale, facile à nettoyer et résistant aux effets prolongés des désinfectants chlorés et des rayons ultraviolets. Une fois la décomposition terminée, le conteneur en alliage de tungstène peut être stérilisé directement à la vapeur haute pression et réutilisé. La doublure intérieure et les déchets sont envoyés à l'installation de stockage centralisée de l'hôpital, éliminant ainsi définitivement la pollution permanente

#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

des surfaces et les risques secondaires liés à la poussière de plomb engendrés par la réutilisation des conteneurs en plomb traditionnels.

### 5.2.5 Conteneur blindé en alliage de tungstène pour la protection des réactifs de diagnostic in vitro

Les kits de réactifs pour le diagnostic in vitro (DIV), notamment ceux destinés aux dosages radio-immunologiques, aux dosages par chimiluminescence et au diagnostic moléculaire, contiennent souvent des radionucléides marqués, tels que l'iode-125, le cobalt-57 et le sélénium-75, utilisés comme référence ou sources de contrôle qualité. Ces réactifs nécessitent un blindage rigoureux et une stabilité d'activité tout au long du processus de production, de transport, de stockage et d'utilisation. Les conteneurs de blindage en alliage de tungstène, grâce à leur miniaturisation, leur caractère amagnétique et leur biosécurité, sont devenus la norme internationale pour la protection des réactifs DIV.

Les applications typiques comprennent :

- Conteneur miniature de protection pour source standard d'iode-125 : d'un diamètre extérieur de quelques millimètres seulement et doté d'une paroi à épaisseur variable, il bloque efficacement les rayons X caractéristiques de l'iode-125 (35 keV). Le marquage couleur et la valeur d'activité de gravure laser sont directement intégrés au kit de réactifs.
- Conteneur intégré pour source d'inondation de cobalt-57/sélénium-75 : corps en alliage de tungstène + fenêtre d'observation en verre au plomb + structure de fixation magnétique, permettant aux techniciens de laboratoire de confirmer visuellement l'emplacement de la source sans ouvrir le couvercle ;
- La boîte de transport de réactifs à chaîne froide est équipée d'un module de blindage en alliage de tungstène : la conception multicompartimentée permet à chaque compartiment de contenir indépendamment une source standard et, grâce à un enregistreur de température et d'humidité, elle peut garantir une activité intacte pendant tout le processus, de -20 °C à +8 °C ;
- conteneur de source de contrôle de qualité intégré : il est fabriqué en alliage de tungstène d'une seule pièce et, associé au bras robotisé de l'instrument, il permet un contrôle de qualité automatique quotidien sans générer de fuite de rayonnement supplémentaire.

tungstène ne permettent un contrôle total du rayonnement de fond des réactifs de diagnostic in vitro, évitant ainsi les inconvénients des conteneurs en plomb traditionnels tels que leur poids important, leur oxydation facile et la contamination irréversible de leur surface. Ils garantissent la constance de l'activité et la sécurité des réactifs tout au long de la chaîne d'approvisionnement mondiale et offrent la protection radiologique la plus fiable pour la précision des immunoessais à haut débit et des diagnostics moléculaires.

### 5.3 Applications des boîtiers de protection en alliage de tungstène dans les domaines des essais industriels et de l'électronique

Les conteneurs de blindage en alliage de tungstène, initialement conçus comme une alternative aux conteneurs en plomb traditionnels dans les domaines des tests industriels et de l'électronique, sont

#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

devenus des composants fonctionnels essentiels qui déterminent la précision des tests, la fiabilité des équipements et le rendement de production. Leur haute densité et leur numéro atomique élevé leur confèrent d'excellentes capacités d'atténuation des rayons gamma et X, des propriétés mécaniques supérieures et une grande précision d'usinage, une absence totale de magnétisme et une stabilité de surface même dans les environnements industriels les plus difficiles. Ils peuvent ainsi répondre simultanément aux exigences extrêmes de protection contre les rayonnements pour la détection de défauts sur le terrain, les salles blanches et les systèmes électroniques à haute fiabilité.

### 5.3.1 Conteneur de blindage en alliage de tungstène pour sources de contrôle radiographique industriel

Les contrôles radiographiques industriels (soudures de pipelines, appareils à pression, pièces moulées aérospatiales, tôles épaisses pour la construction navale et grandes pièces forgées) utilisent des sources scellées à haute activité composées d'iridium-192, de sélénium-75 et de cobalt-60. Ces contrôles exigent un conteneur de blindage offrant une protection omnidirectionnelle à 360° et une résistance élevée, tout en maintenant une fenêtre de sortie du faisceau directionnelle précisément contrôlable. Ce conteneur doit également résister aux transports, aux levages et aux chutes accidentelles fréquents, même dans des conditions extrêmes telles que sur le terrain, dans les chantiers navals et en haute altitude. Les conteneurs de blindage en alliage de tungstène, grâce à leur efficacité de blindage volumétrique et leur résistance à la déformation nettement supérieures à celles du plomb, sont devenus la norme pour les équipements de contrôle radiographique industriel dans le monde entier.

Les cuves de détection de défauts classiques utilisent des alliages tungstène-nickel-fer à haute résistance. L'épaisseur de la paroi principale est optimisée de manière non uniforme en fonction de l'activité et de l'énergie de la source : elle est maximale dans les directions opposées à l'émission du faisceau, tandis que la direction d'émission est équipée de collimateurs rotatifs en alliage de tungstène, de forme conique, en éventail ou en fente, usinés avec précision. Ces collimateurs sont réglables en continu de 0 à 360° par une molette externe ou un servomoteur, avec un réglage progressif de la largeur du faisceau. La structure interne du collimateur utilise un assemblage multicouche et des rails de guidage en queue d'aronde de précision micrométrique, garantissant ainsi la stabilité de l'écart et du positionnement, même après des centaines de milliers de réglages. La surface extérieure du réservoir est recouverte d'un revêtement élastique WC ou polyurée projeté à la flamme supersonique, résistant à l'huile, à la poussière de sable et aux projections de soudure, permettant une utilisation à long terme sur les plateformes offshore, les champs pétroliers désertiques et les chantiers de construction de pipelines sibériens extrêmement froids sans poudrage ni fissures.

Les principaux éléments structurels comprennent :

- Le canal de source à changement rapide adopte une conception de type « poussette » avec double étanchéité, permettant aux opérateurs de charger et de décharger la source à l'extérieur de la chambre noire, la dose de rayonnement pendant tout le processus étant proche de zéro.

#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

- Le système intégré de détection et de verrouillage de la position de la source permet d'ouvrir le verrou de transport uniquement lorsque la fenêtre de collimation est complètement fermée et que la source est immergée en position sûre au fond du réservoir.
- Il est conforme aux normes internationales ISO 3999 et GB/T 1933 et a passé avec succès des tests comprenant une chute libre de neuf mètres, un impact à quatre coins d'un mètre, un test de flamme d'une demi-heure à 800 °C et un test d'empilement.

Les conteneurs de source de détection de défauts en alliage de tungstène ont permis aux tests radiographiques industriels de réaliser un bond technologique, passant du « conteneur en plomb + télécommande à tube long » au « conteneur de source directionnelle compact + robot chenillé ».

### 5.3.2 Boîtier de blindage en alliage de tungstène pour la suppression des interférences des composants électroniques

Les systèmes électroniques à haute fiabilité (équipements électroniques aérospatiaux, sondes spatiales, systèmes d'instrumentation et de contrôle des centrales nucléaires, cartes mères des stations de base 5G, circuits supraconducteurs pour l'informatique quantique) sont extrêmement sensibles aux effets d'événements uniques (SEE), aux effets de dose totale (TID) et aux effets d'irradiation transitoire causés par les rayons gamma, les neutrons et les impulsions électromagnétiques de haute énergie (HEMP). Les boîtiers traditionnels en aluminium avec blindage en feuille de plomb ou en composite plastique boruré ne répondent plus aux exigences globales des équipements électroniques de nouvelle génération en termes de poids, de volume, d'efficacité de blindage et de protection multispectrale. Les conteneurs de blindage en alliage de tungstène, grâce à leur coefficient d'atténuation gamma extrêmement élevé, leurs excellentes capacités de modération et d'absorption des neutrons, leurs propriétés amagnétiques complètes et leurs performances d'étanchéité sous vide supérieures, constituent la solution idéale pour le durcissement des composants électroniques aux radiations.

Les applications typiques couvrent les quatre catégories suivantes :

1. Les équipements électroniques aérospatiaux, les charges utiles satellitaires, les capteurs stellaires et les récepteurs de navigation utilisent une structure multicouche en alliage de tungstène, dotée d'une couche d'absorption de neutrons en bore riche en hydrogène. Cette structure atténue, en une seule étape, les protons de haute énergie provenant des ceintures de radiation terrestres ainsi que les rayons gamma et les neutrons secondaires générés par les rayons cosmiques galactiques, les ramenant en dessous du seuil de tolérance du dispositif. Le boîtier est constitué d'un système non magnétique en tungstène-nickel-cuivre présentant des gradients d'épaisseur de paroi optimisés. Un brasage sous vide ou un soudage par faisceau d'électrons assure une étanchéité parfaite, tandis que l'intérieur est rempli de caoutchouc de silicone à faibles émissions pour l'amortissement des vibrations et la conductivité thermique.
2. Les composants électroniques essentiels des sondes spatiales, tels que le compartiment électronique principal des rovers martiens, des atterrisseurs lunaires et des sondes joviennes, exposés à des environnements de rayonnement intense pendant de longues périodes, utilisent une chambre de blindage intégrée en alliage de tungstène, elle-même enfermée dans une coque

#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT



renforcée de fibres de carbone, ce qui permet une protection maximale tout en minimisant le poids. La surface de l'alliage de tungstène est plaquée or ou revêtue de DLC, ce qui empêche le soudage à froid et supprime les émissions d'électrons secondaires.

3. Les flux gamma instantanés de haute énergie susceptibles de se produire lors d'accidents transitoires de réservoir d'irradiation (LOCA, MSLB) dans le système d'instrumentation et de contrôle de sûreté d'une centrale nucléaire peuvent induire des dysfonctionnements dans ce système numérique. Le réservoir blindé en alliage de tungstène est intégré à l'armoire d'instrumentation et de contrôle selon une structure modulaire à tiroirs, renfermant intégralement les automates programmables, les FPGA et la mémoire. Le corps du réservoir est constitué d'un alliage tungstène-nickel-fer à faible activation afin de garantir l'absence de nucléides interférents à longue durée de vie après une irradiation neutronique prolongée.
4. En informatique quantique et dans les dispositifs électroniques supraconducteurs, le blindage local des qubits supraconducteurs et des jonctions Josephson est crucial en raison de leur extrême sensibilité aux rayons cosmiques. Un conteneur de blindage miniature en alliage de tungstène est intégré à l'étage cryogénique ( $< 10$  mK) d'un réfrigérateur à dilution. Combiné à une couche interne de blindage magnétique en micrométal et à un blindage en niobium supraconducteur, ce dispositif permet d'intercepter la quasi-totalité des particules secondaires issues des rayons cosmiques, garantissant ainsi un temps de cohérence quantique parmi les plus performants au niveau international.

tungstène ne dans le domaine de la protection contre les interférences des composants électroniques ont réduit le taux de retournement des particules individuelles de plusieurs ordres de grandeur et augmenté la tolérance à la dose totale de 5 à 10 fois celle des solutions traditionnelles, devenant ainsi une technologie clé permettant aux systèmes électroniques à haute fiabilité de passer de la « peur des radiations » à l'« audace d'émettre ».

### 5.3.3 Conteneur de blindage en alliage de tungstène pour les essais de fabrication de semi-conducteurs

Dans la fabrication et le contrôle des plaquettes de semi-conducteurs, tout rayonnement de fond gamma/X provenant de l'environnement ou des équipements eux-mêmes peut être interprété à tort comme un défaut, entraînant la destruction des plaquettes et d'importantes pertes économiques. Les conteneurs de blindage en alliage de tungstène, grâce à leur pureté ultra-élevée, leur faible activation, leur excellente uniformité microscopique et leur capacité de traitement à l'échelle du micron, sont devenus un composant essentiel pour le contrôle du rayonnement de fond dans les usines de fabrication de plaquettes de pointe.

Ces conteneurs de blindage sont principalement utilisés pour les équipements de réinspection des défauts par rayons X, les analyseurs de fluorescence X, les systèmes de détection de faisceaux d'électrons et le blindage local des sources de lithographie ultraviolette extrême. Le corps du conteneur est constitué d'un système non magnétique en tungstène-nickel-cuivre ultra-pur, dont le contrôle des impuretés atteint un niveau maximal, garantissant l'absence de pics d'interférence d'activation détectables lors d'un fonctionnement prolongé. L'ouverture de collimation et la paroi de blindage sont usinées avec précision

#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

en une seule pièce, assurant une précision d'ouverture et de positionnement extrêmement élevée afin de garantir la pureté et la focalisation du faisceau de rayons X. Le traitement de surface combine une aluminisation sous vide et un revêtement en carbone amorphe (DLC), empêchant le soudage à froid et supprimant l'émission d'électrons secondaires. L'utilisation de conteneurs de blindage en alliage de tungstène élimine complètement le problème des faux défauts causés par des traces de radioactivité naturelle dans les blindages en plomb traditionnels, permettant ainsi à la sensibilité et à la fiabilité de la détection des défauts sur les plaquettes d'atteindre les limites des exigences des procédés de pointe.

#### 5.3.4 Conteneur de blindage en alliage de tungstène pour équipement de contrôle non destructif

Les équipements de contrôle non destructif haut de gamme imposent des exigences extrêmement élevées en matière de contrôle des fuites, de précision de collimation et de stabilité géométrique à long terme des sources de rayons X. Les conteneurs de blindage en alliage de tungstène, grâce à leurs propriétés exceptionnelles de haute densité, de dureté élevée, de résistance aux hautes températures et aux dommages mécaniques, ont complètement remplacé les structures composites traditionnelles en plomb et acier. Ils sont devenus les composants essentiels de blindage et de collimation dans les systèmes de tomographie industrielle, d'imagerie radiographique numérique et de contrôle des accélérateurs de haute énergie.

Une structure typique comprend une enveloppe de blindage intégrée pour cibles fixes et rotatives, un collimateur primaire, des collimateurs secondaires et un système de fentes programmables. Le conteneur est fabriqué en alliage tungstène-nickel-fer haute résistance. Sa structure multicouche imbriquée et sa fenêtre rotative en forme d'éventail assurent un blindage complet dans la direction non active et un contrôle précis du faisceau dans la direction active. Un revêtement dur en carbure de tungstène ou en nitrure de chrome est appliqué en surface, lui permettant de résister à une rotation à grande vitesse prolongée et aux projections de soudage sans usure ni écaillage. L'utilisation de conteneurs de blindage en alliage de tungstène améliore considérablement le contraste d'image et la détection des défauts, tout en réduisant sensiblement la dose d'irradiation autour de l'équipement. Il s'agit donc d'un élément essentiel du contrôle qualité dans les secteurs de fabrication de pointe, tels que les aubes de moteurs d'avion, les cuves de centrales nucléaires et les grandes structures en matériaux composites.

#### 5.3.5 Boîtiers de blindage en alliage de tungstène pour la protection des instruments électroniques de précision

Les instruments de métrologie de haute précision, les équipements de caractérisation à l'échelle nanométrique et les dispositifs expérimentaux de physique fondamentale sont extrêmement sensibles au bruit et à la dérive causés par les rayons cosmiques, le rayonnement gamma ambiant et les neutrons. Les conteneurs de blindage en alliage de tungstène, grâce à leur efficacité de blindage volumétrique maximale, leurs propriétés totalement amagnétiques et leur stabilité à très longue durée de vie, constituent le blindage physique ultime pour une précision de mesure optimale. Parmi les applications typiques, on peut citer le blindage partiel ou total des balances analytiques, des microscopes à force atomique, des microscopes à effet tunnel, des interféromètres laser, des systèmes de navigation inertielle et des composants clés pour la détection des ondes gravitationnelles. Le conteneur utilise généralement une

#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

structure composite multicouche en alliage de tungstène et en matériau absorbant les neutrons, remplie intérieurement d'un milieu conducteur de chaleur à faibles émissions, et sa surface extérieure subit un traitement de compatibilité avec le vide. Le système d'étanchéité utilise des anneaux à soufflets métalliques ou des brides à arêtes vives pour garantir une étanchéité à long terme dans les environnements d'ultravide. L'utilisation de conteneurs de blindage en alliage de tungstène réduit considérablement le rayonnement ambiant, éliminant totalement les interférences de faible énergie dues aux chaînes de désintégration présentes dans les blindages en plomb traditionnels. Il en résulte une stabilité et une répétabilité sans précédent des instruments lors de mesures de longue durée, ce qui en fait un élément indispensable de la radioprotection dans les expériences de métrologie, de nanotechnologie et de physique de précision.

#### 5.4 Applications des boîtiers de protection en alliage de tungstène dans le domaine aérospatial

tungstène, initialement considérés comme des composants auxiliaires, sont devenus une technologie clé qui détermine le succès des missions et la durée de vie des systèmes. Leur efficacité de blindage volumétrique extrêmement élevée, leur faible densité surfacique, leurs propriétés totalement amagnétiques, leur stabilité sur une très large plage de températures, leur taux de dégazage extrêmement faible et leur fiabilité à long terme sous vide, en présence de fortes vibrations et de particules de haute énergie en font la seule plateforme matérielle haut de gamme pour la protection contre les rayonnements spatiaux, les essais de simulation au sol et les essais de matériaux avancés.

##### 5.4.1 Conteneur de blindage en alliage de tungstène pour essais de rayonnement aérospatial

Les équipements électroniques aérospatiaux, les matériaux sensibles et les charges utiles biologiques doivent subir des tests de simulation d'environnement radiatif spatial au sol avant leur mise en orbite. Ces tests nécessitent des conteneurs capables de reproduire fidèlement les champs de rayonnement combinés des protons de haute énergie, des ions lourds, des rayons gamma et des neutrons, tout en assurant une protection quasi totale contre les rayonnements provenant de directions non ciblées afin de protéger les installations et le personnel. Les conteneurs de blindage en alliage de tungstène, grâce à leur ultra-pureté, leur faible activation et leur excellente précision d'usinage, sont devenus la norme pour les principaux dispositifs de simulation d'environnement spatial au sol, tant au niveau national qu'international.

Ces conteneurs utilisent des systèmes tungstène-nickel-cuivre ou tungstène-nickel-fer à faible activation, avec une cavité interne équipée de plaques de dégradation d'énergie, de modérateurs et d'absorbeurs de neutrons combinables de manière flexible. Ceci permet un large spectre de transfert d'énergie linéaire et un contrôle précis du débit de fluence au sein d'un seul conteneur. L'extérieur du conteneur est revêtu d'une couche haute température compatible avec le vide, tandis que l'intérieur intègre un système de surveillance de dose multipoint et de contrôle de la température, garantissant ainsi des tests à température optimale. Le système d'étanchéité, composé de joints toriques métalliques et de multiples dispositifs de détection de fuites, assure une étanchéité à long terme sous ultravide. L'utilisation de conteneurs de blindage en alliage de tungstène maximise la fidélité et la sécurité des champs de rayonnement lors

#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

d'expériences de simulation au sol, ce qui en fait un équipement essentiel pour les applications spatiales unitaires, le durcissement des puces et la vérification d'expériences biologiques dans l'espace lointain.

#### 5.4.2 Conteneurs de blindage en alliage de tungstène pour la protection des composants des engins spatiaux

Les engins spatiaux en orbite sont soumis à un bombardement continu dû aux ceintures de Van Allen, aux éruptions de protons solaires et aux rayons cosmiques galactiques. Leurs composants critiques, tels que les capteurs stellaires, les centrales inertielles, la mémoire et les processeurs, sont extrêmement sensibles aux effets d'événements uniques et aux défaillances dues à l'accumulation de doses. Les conteneurs de blindage en alliage de tungstène, grâce à un blindage ponctuel localisé et à leur intégration à la cloison étanche, offrent la protection la plus efficace contre les radiations spatiales pour ces composants sensibles.

Les applications typiques comprennent les protections de têtes optiques, les boîtiers de blindage pour cartes de circuits imprimés, les boîtiers de collimation et de blindage intégrés pour détecteurs de charges utiles scientifiques, et les tiroirs de protection dynamiques amovibles pour cabines habitées. Le réservoir utilise un système non magnétique tungstène-nickel-cuivre, dont l'épaisseur de paroi est optimisée en fonction de l'environnement radiatif orbital. Une couche interne composite à base d'hydrogène absorbant les neutrons est souvent appliquée, et la surface extérieure est revêtue de traitements anti-soudage à froid et de revêtements à faibles émissions. La conception structurelle assure un équilibre entre la minimisation du poids et la protection multidirectionnelle, et les méthodes d'étanchéité et de fixation répondent aux exigences des vibrations en phase de lancement et des cycles thermiques en orbite. L'utilisation de réservoirs de blindage en alliage de tungstène prolonge considérablement la durée de fonctionnement sans défaillance en orbite des composants clés, constituant ainsi une garantie technologique essentielle pour une longue durée de vie et une haute fiabilité des constellations de navigation en orbite haute, des sondes spatiales et des programmes de vols spatiaux habités.

#### 5.4.3 Conteneur de blindage en alliage de tungstène pour les essais de matériaux aérospatiaux

Des composants clés tels que les aubes de moteurs d'avion, les structures de fuselage en matériaux composites, les enveloppes de propergol solide et les boucliers thermiques de rentrée atmosphérique nécessitent des essais non destructifs de haute précision et une analyse de composition dès la phase de développement. Ceci requiert un équipement de test présentant un bruit de fond extrêmement faible, une pureté de faisceau extrêmement élevée et une stabilité géométrique extrême. Les conteneurs de blindage en alliage de tungstène et leurs systèmes de collimation sont devenus des composants essentiels et irremplaçables pour le contrôle qualité de ces matériaux de pointe.

Ce système comprend des cibles de blindage et des systèmes de collimation pour les aubes monocristallines de moteurs aéronautiques, des conteneurs de sources d'imagerie numérique par rayons X pour les composants structuraux composites de grande taille, des conteneurs de sources directionnelles pour la détection de défauts par rayons gamma dans les enveloppes de fusées à propergol solide, ainsi que des conteneurs d'échantillons pour l'analyse par diffraction des rayons X et des neutrons des

#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

matériaux de rentrée atmosphérique. Le corps du conteneur est fabriqué en alliage tungstène-nickel-fer haute résistance, avec un orifice de collimation et une paroi de blindage usinés avec précision en une seule pièce, et une surface revêtue d'un traitement dur résistant aux hautes températures et aux étincelles. L'utilisation de conteneurs de blindage en alliage de tungstène minimise le bruit de fond et les fuites de rayonnement des équipements de test, permettant d'atteindre des niveaux de contraste d'image et de précision de quantification des défauts parmi les plus élevés du secteur. Ce système est devenu la pierre angulaire de l'assurance qualité des matériaux dans les grands projets d'ingénierie tels que les gros avions de ligne, les lanceurs spatiaux et les sondes lunaires et martiennes. Sa stabilité à long terme, même dans des conditions de test extrêmes, offre également le support technique le plus fiable pour l'évaluation non destructive des matériaux destinés aux futurs aéronefs réutilisables et aux statoréacteurs à combustion supersonique.

## **5.5 Application des boîtes de protection en alliage de tungstène dans la recherche et l'expérimentation scientifiques**

Les conteneurs de blindage en alliage de tungstène, initialement utilisés comme composants de protection de laboratoire, sont devenus des matériaux fonctionnels essentiels qui déterminent le bruit de fond expérimental, la précision des mesures et les limites de performance des détecteurs. Leur coefficient d'atténuation gamma/X extrêmement élevé, leurs excellentes capacités d'absorption et de modération des neutrons, leur très grande pureté et leur faible activation, leur amagnétisme total et leur stabilité à long terme sous vide poussé, à basse température et en présence de champs magnétiques intenses en font des équipements indispensables pour les expériences de pointe en physique nucléaire, en physique des particules, en surveillance de la radioactivité environnementale et dans des domaines interdisciplinaires.

### **5.5.1 Conteneur de blindage en alliage de tungstène pour échantillons expérimentaux de physique nucléaire**

Les expériences de physique nucléaire (spectroscopie de diffusion des neutrons, mesure des sections efficaces des réactions nucléaires, études des produits de fission et de capture, et préparation d'isotopes de précision) nécessitent des conteneurs d'échantillons qui, tout en contenant des cibles de haute activité ou des produits d'irradiation, soient parfaitement transparents au faisceau incident et offrent une protection extrêmement efficace contre les rayonnements non ciblés, tout en présentant des produits d'auto-activation extrêmement faibles qui n'interfèrent pas avec les mesures ultérieures de spectres gamma ou neutroniques. Les conteneurs de blindage en alliage de tungstène, grâce à leur haute densité, leur faible activation et leur excellente précision d'usinage, sont devenus la norme pour les sources de neutrons par spallation, les lignes de faisceau de neutrons des réacteurs et les cellules chaudes de production d'isotopes.

Les conteneurs d'échantillons classiques utilisent des systèmes à faible activation en tungstène-nickel-cuivre ou tungstène-nickel-fer ultra-purs. L'épaisseur de la paroi du conteneur est optimisée de manière non uniforme en fonction de l'énergie des neutrons incidents et de l'activité du noyau cible. La zone de la fenêtre d'incidence est localement amincie afin de ne conserver que la résistance structurelle nécessaire, tandis que la zone de sortie est constituée de plusieurs couches de plaques de dégradation amovibles et

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



d'inserts absorbants. L'ensemble de la cavité interne est poli miroir et revêtu de carbone amorphe ou de nitrure de bore pour empêcher l'adhérence de l'échantillon et supprimer l'émission d'électrons secondaires. Le système d'étanchéité utilise des brides métalliques à arêtes vives ou un soudage à l'arc sous hélium pour une fermeture permanente, garantissant un ultravide et un environnement propre et exempt d'oxygène. L'utilisation de conteneurs de blindage en alliage de tungstène réduit le bruit de fond dans les expériences de physique nucléaire à des niveaux extrêmement bas, améliorant considérablement la sensibilité de détection des réactions nucléaires rares et des signaux faibles. Ce dispositif est devenu un composant essentiel des spectromètres de diffusion de neutrons, des détecteurs de neutrons rétrodiffusés et des terminaux de mesure de données nucléaires.

### 5.5.2 Conteneur de blindage en alliage de tungstène pour expériences de physique des particules

Les expériences de physique des particules (détecteurs de collisionneurs de haute énergie, détection directe de la matière noire, expériences d'oscillation des neutrinos et réseaux de détecteurs de rayons cosmiques) imposent des exigences extrêmement élevées aux matériaux absorbants des calorimètres électromagnétiques, des calorimètres hadroniques et des détecteurs de muons. Elles requièrent une densité extrêmement élevée, des longueurs de rayonnement et d'interaction courtes, ainsi qu'une stabilité à long terme exceptionnelle. Les conteneurs de blindage en alliage de tungstène, ainsi que leurs dérivés (plaques, blocs et structures fibreuses), sont devenus les milieux d'absorption et de blindage privilégiés pour les détecteurs de particules de nouvelle génération.

Dans les détecteurs améliorés du Grand collisionneur de hadrons (LHC), des alliages de tungstène sont intégrés au cœur du calorimètre électromagnétique sous forme de blocs trapézoïdaux ou de conteneurs cylindriques usinés avec précision, garantissant des longueurs de rayonnement extrêmement courtes et des rendements photoélectroniques extrêmement élevés. Lors des expériences de détection de matière noire profonde, des conteneurs de blindage en alliage de tungstène servent de blindage actif externe, formant une structure multicouche emboîtée avec des couches internes de cuivre sans oxygène, de plomb ancien et de plomb romain ancien, supprimant ainsi le bruit de fond ambiant gamma et neutronique en dessous du seuil de sensibilité du détecteur. Le système d'anticoïncidence des muons dans les expériences sur les neutrinos utilise des conteneurs en alliage de tungstène à parois épaisses comme absorbeurs de muons, distinguant efficacement les interactions des muons des rayons cosmiques de celles des neutrinos. L'utilisation de conteneurs de blindage en alliage de tungstène a permis aux détecteurs clés des expériences de physique des particules d'atteindre une résolution énergétique plus élevée, des taux de déclenchement erronés plus faibles et des plages dynamiques plus larges, devenant ainsi la base matérielle la plus solide pour explorer la nouvelle physique et les mécanismes de masse des particules de matière noire et des neutrinos.

### 5.5.3 Conteneur de blindage en alliage de tungstène pour la surveillance des rayonnements environnementaux

La surveillance des rayonnements environnementaux (radioactivité atmosphérique de fond, émission de radon du sol, radioactivité marine et flux de particules secondaires cosmiques) exige des détecteurs présentant un bruit de fond extrêmement faible, une grande stabilité et une longue durée de vie, sur une

#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

gamme d'énergies extrêmement large et dans des environnements extrêmes. Les conteneurs de blindage en alliage de tungstène, grâce à leur efficacité de blindage volumétrique maximale, leur faible activation et leurs propriétés totalement amagnétiques, sont devenus l'enveloppe de blindage de base pour les spectromètres gamma au germanium de haute pureté, les systèmes anti-Compton, les moniteurs de neutrons et les détecteurs de muons cosmiques. Les conteneurs de surveillance classiques utilisent une structure composite multicouche : la couche externe est en plomb ancien ou en plomb romain pour protéger l'environnement des rayons gamma ; la couche intermédiaire est un conteneur en alliage de tungstène qui absorbe avec précision les rayons gamma de haute énergie et les particules secondaires ; et la couche interne est en cuivre sans oxygène ou en polyéthylène pour supprimer les neutrons thermiques et le bruit thermique. La couche en alliage de tungstène utilise un système tungstène-nickel-cuivre ultra-pur, avec un nickelage sous vide ou un traitement de nitruration en surface afin de garantir l'absence de pics d'activation détectables lors d'un déploiement prolongé sur le terrain. La conception du conteneur allie portabilité et modularité, permettant un fonctionnement autonome de longue durée sur les calottes glaciaires de l'Antarctique, dans les zones inhabitées de haute altitude et au sein des réseaux de télescopes à neutrinos sous-marins. L'utilisation de conteneurs de blindage en alliage de tungstène a permis de réduire le taux de comptage de fond des équipements de surveillance de la radioactivité environnementale à un niveau extrêmement bas, améliorant considérablement la capacité à détecter les fuites de nucléides artificiels, les variations des rayons cosmiques et les fluctuations subtiles du rayonnement de fond naturel. Ce dispositif est devenu un élément de mesure indispensable pour le réseau mondial de surveillance du rayonnement de fond environnemental, le système national d'intervention d'urgence nucléaire et la recherche interdisciplinaire en sciences de la Terre.

## 5.6 Applications des boîtiers de protection en alliage de tungstène dans d'autres domaines spécifiques

Les conteneurs blindés en alliage de tungstène, grâce à leur adaptabilité aux environnements extrêmes, leur grande modularité fonctionnelle et leurs possibilités de personnalisation élevées, sont largement utilisés dans des contextes spécifiques, au-delà des domaines conventionnels. Ces contextes impliquent généralement des exigences en matière de températures, de pressions, de propreté ou de confidentialité extrêmes, et les conteneurs blindés en alliage de tungstène constituent souvent la seule solution technique permettant de répondre simultanément aux exigences fonctionnelles, de sécurité et réglementaires.

### 5.6.1 Boîtiers de blindage en alliage de tungstène personnalisés pour environnements spéciaux

Les solutions sur mesure pour environnements spéciaux sont principalement conçues pour les grands fonds marins, les régions polaires, le vide poussé, les températures extrêmement élevées ou basses, la corrosion intense ou les conditions de travail extrêmes complexes. Les boîtiers de blindage en alliage de tungstène permettent de réaliser des tâches que les matériaux de blindage ordinaires ne peuvent accomplir grâce à une conception ciblée des systèmes de matériaux, des formes structurelles et des fonctions de surface. Le télescope à neutrinos sous-marin et la station de surveillance de la radioactivité des fonds marins utilisent des conteneurs de blindage à parois épaisses en tungstène-nickel-fer résistant aux hautes pressions, associés à des enveloppes en alliage de titane et des interfaces étanches par fibres optiques. Ces conteneurs peuvent contenir des détecteurs au germanium de haute pureté et des sources d'étalonnage

#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

au cobalt-60 pendant de longues périodes à des profondeurs de plusieurs dizaines de milliers de mètres. Le réseau de détection des rayons cosmiques dans la calotte glaciaire polaire utilise des conteneurs de blindage en alliage de tungstène ultra-pur, recouverts de plusieurs couches d'isolation thermique et de revêtements antigivre afin de garantir le maintien de l'efficacité du blindage contre le bruit de fond dans l'environnement extrêmement froid de l'Antarctique. Le blindage local de la ligne de faisceau de l'accélérateur à ultra-vide utilise des conteneurs emboîtés en alliage de tungstène brasés sous vide, présentant des taux de dégazage interne extrêmement faibles et des surfaces plaquées or pour éviter le soudage à froid, permettant ainsi un fonctionnement à long terme dans les systèmes à ultra-vide sans contamination du faisceau. Le système de diagnostic plasma à ultra-haute température utilise un conteneur composite en alliage de tungstène et revêtement en molybdène-lanthane, capable de contenir des cristaux détecteurs de neutrons et de rayons gamma dans des environnements où la température instantanée dépasse 1 000 °C. Les conteneurs de stockage à long terme pour les déchets radioactifs liquides fortement acides et alcalins sont constitués d'une structure en tungstène-nickel-cuivre, d'un revêtement en Hastelloy et d'une enveloppe extérieure en fluoroplastique, garantissant une durée de vie de confinement d'un siècle.

tungstène pour environnements spéciaux ont permis à l'homme de mener des activités scientifiques liées aux radiations aux limites naturelles et techniques les plus extrêmes, et sont devenus une infrastructure essentielle pour les expériences menées dans les profondeurs de la terre, des mers profondes, de l'espace lointain et dans des conditions physiques extrêmes.

### 5.6.2 Réservoirs de protection en alliage de tungstène pour l'exploration géologique et l'exploitation minière

L'exploration et l'exploitation minières impliquent la manipulation de minéraux radioactifs associés à l'uranium, au thorium et aux terres rares, ainsi que la diagrapie des puits de pétrole et de gaz. Ces activités nécessitent un confinement et un transport rapides, sûrs et non polluants sur site des carottes radioactives naturelles, des échantillons minéraux et des sources de diagrapie, dans des environnements à haute température, forte humidité, forte concentration de poussières et fortes vibrations. Les conteneurs de blindage en alliage de tungstène, grâce à leur conception légère, leur résistance aux environnements extrêmes et leur imperméabilité totale à la décontamination, sont devenus un équipement standard pour la gestion des échantillons radioactifs dans le cadre de l'exploration et de l'exploitation minières.

Le conteneur de protection en alliage de tungstène pour l'exploration utilise un système non magnétique anticorrosion en tungstène-nickel-cuivre, un bouchon à vis à ouverture rapide et un joint conique autocentrant, permettant le carottage et le confinement directement à côté de l'échantillon prélevé sur l'appareil de forage. La paroi intérieure du conteneur est polie miroir et sa surface extérieure est revêtue d'un revêtement élastique en polyurée, le rendant résistant à la corrosion à long terme due aux températures élevées du désert, aux basses températures des sols gelés, aux pluies acides et aux sols salins-alcalins. Le conteneur de source en alliage de tungstène pour la diagrapie des puits de pétrole et de gaz est doté d'un système de collimation directionnelle et d'un canal de changement rapide de source, combiné à une structure de fond de puits résistante aux vibrations et aux hautes températures, assurant un confinement fiable des sources de neutrons au césium-137 et à l'américium-béryllium dans les

#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

environnements de fond de puits à haute température et haute pression. Les conteneurs de convoyeur blindés modulaires en alliage de tungstène sont utilisés dans les lignes de tri de minerais radioactifs des mines pour réaliser un tri automatique du minerai et une isolation précise des blocs hautement radioactifs.

tungstène ne permettent un échantillonnage propre, sans contamination cutanée ni diffusion d'aérosols, lors des explorations géologiques, améliorant considérablement la représentativité des échantillons et la sécurité du personnel. Parallèlement, ils ont résolu définitivement le problème de la pollution aux métaux lourds dans les prairies et le désert de Gobi, causé par l'abandon des conteneurs en plomb traditionnels, et sont devenus un outil indispensable de gestion de la radioprotection pour l'exploration et l'exploitation des ressources en uranium, en terres rares et en hydrocarbures.

### 5.6.3 Réservoirs de protection en alliage de tungstène pour l'exploration géologique et l'exploitation minière

Les opérations d'exploration géologique et d'exploitation minière se déroulent souvent dans des environnements de terrain isolés et difficiles, impliquant la manipulation d'uranium, de thorium, de minéraux radioactifs associés aux terres rares et de sources radioactives issues de la diagraphie des puits de pétrole et de gaz. Ceci requiert des conteneurs de blindage légers, résistants aux intempéries, aux fortes vibrations, à la poussière et aux embruns salins, et capables d'une ouverture et d'une fermeture rapides ainsi que d'une décontamination complète. Les conteneurs de blindage en alliage de tungstène, grâce à leur efficacité de blindage volumique nettement supérieure à celle du plomb, leur résistance structurelle extrêmement élevée et leur inertie chimique de surface, ont complètement remplacé les conteneurs traditionnels en plomb et en acier, devenant ainsi l'équipement standard pour la gestion des échantillons radioactifs et des sources radioactives dans les industries géologiques et minières. Les conteneurs de prélèvement de carottes de terrain utilisent un système non magnétique et résistant à la corrosion en tungstène-nickel-cuivre, doté d'un bouchon à vis à ouverture rapide et d'une structure conique auto-centrante. Ceci permet un confinement immédiat des carottes après leur extraction, à proximité immédiate de l'appareil de forage, empêchant ainsi toute diffusion de poussières et d'aérosols. La paroi intérieure du conteneur est polie miroir et revêtue d'un revêtement fluoré facile à nettoyer, tandis que sa surface extérieure est recouverte d'un revêtement élastique en polyurée résistant aux huiles et aux embruns salins. Ce revêtement lui permet de rester lisse même après une exposition prolongée aux températures désertiques, au froid extrême, aux sols gelés, aux pluies acides et aux sols salins-alcalins. Les conteneurs de sources en alliage de tungstène utilisés pour la diagraphie des puits de pétrole et de gaz sont dotés d'une collimation directionnelle, d'un canal de changement rapide de source et d'une conception résistante aux vibrations de fond de puits. Ils assurent un confinement fiable des sources de neutrons de césium-137 et d'américium-béryllium dans les puits à haute température et haute pression. Des conteneurs de transport blindés modulaires en alliage de tungstène sont utilisés dans les lignes de tri des minerais à haute radioactivité des mines pour automatiser le tri et isoler précisément les blocs de haute radioactivité. L'utilisation systématique de ces conteneurs permet une gestion rigoureuse de l'ensemble de la chaîne, de l'échantillonnage au transport, lors des opérations d'exploration géologique et d'exploitation minière. Elle réduit ainsi considérablement la dose de rayonnement reçue par le personnel de terrain et les risques de pollution environnementale. Il est devenu un outil indispensable de

#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT



radioprotection pour l'exploration et le développement des ressources en uranium, en terres rares, en pétrole et en gaz, ainsi que pour l'utilisation des ressources minérales radioactives.

#### 5.6.4 Conteneur de blindage en alliage de tungstène pour essais de rayonnement aérospatial

Les expériences de simulation au sol des rayonnements aérospatiaux exigent la reproduction précise, en laboratoire, des champs de rayonnement combinés de protons de haute énergie, d'ions lourds, de rayons gamma et de neutrons en orbite, tout en assurant un blindage quasi complet des directions non ciblées afin de protéger la salle d'essai et les opérateurs. Les conteneurs de blindage en alliage de tungstène, grâce à leurs caractéristiques de faible activation ultra-pures, leur excellente uniformité microscopique et leur usinage de précision, sont devenus les conteneurs d'essai de référence pour les principaux dispositifs de simulation d'environnement spatial, tant au niveau national qu'international.

L'enceinte d'essai utilise un système tungstène-nickel-cuivre ou tungstène-nickel-fer à faible activation. L'épaisseur de la paroi est conçue avec un gradient non uniforme en fonction du type et de l'énergie des particules incidentes. La fenêtre d'incidence est localement amincie, et la sortie est constituée de plusieurs couches de plaques de dégradation d'énergie, de couches de modulation de neutrons et d'absorbeurs, combinables de manière flexible, permettant ainsi un large spectre de transfert d'énergie linéaire et un contrôle précis du débit de fluence. L'extérieur de l'enceinte est revêtu d'une couche haute température compatible avec le vide, et l'intérieur intègre des sondes de surveillance de dose multipoints et un système de contrôle de la température afin de garantir la possibilité de réaliser des essais à toutes les températures. Le système d'étanchéité utilise une bride métallique à arête vive ou une structure d'étanchéité permanente par soudage par faisceau d'électrons pour garantir un ultravide et un environnement propre et exempt d'oxygène. Les conteneurs de blindage en alliage de tungstène sont largement utilisés dans les terminaux des accélérateurs de protons/ions lourds, les lignes de faisceau de rétrodiffusion des sources de neutrons de spallation, les chambres d'irradiation des grandes sources de cobalt-60 et les modules intégrés de simulation d'environnement spatial. Ils constituent un matériel essentiel pour vérifier l'adaptabilité à l'environnement spatial des composants électroniques embarqués, des puces durcies aux radiations, des charges utiles scientifiques destinées à l'exploration spatiale lointaine et des expériences biologiques menées lors des vols spatiaux habités. Leur utilisation garantit une fidélité et une sécurité optimales du champ de rayonnement lors des simulations au sol, offrant ainsi les méthodes de test au sol les plus réalistes et rigoureuses pour la conception de véhicules spatiaux à longue durée de vie et haute fiabilité.

#### 5.6.5 Conteneur de blindage en alliage de tungstène pour échantillons expérimentaux de physique nucléaire

Les expériences de physique nucléaire imposent des exigences extrêmement strictes aux conteneurs d'échantillons : ces derniers doivent être pratiquement transparents aux faisceaux de neutrons ou de particules chargées incidents, assurer une protection extrêmement efficace contre les rayons gamma, les neutrons, les fragments de fission et les particules secondaires, tout en présentant une section efficace d'activation extrêmement faible, des périodes de demi-vie extrêmement courtes pour les produits d'activation et en n'interférant pas avec les mesures spectroscopiques de précision ultérieures. Les conteneurs de blindage en alliage de tungstène, grâce à leurs caractéristiques d'activation ultra-pures et

#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT



faibles, leur excellente capacité de blindage combiné neutrons-gamma et leur usinage de précision micrométrique, sont devenus les conteneurs d'échantillons de choix pour les lignes de flux de faisceaux de neutrons de réacteurs, les terminaux de spectromètres de sources de neutrons de spallation, les stations cibles de cyclotrons et les dispositifs de mesure de données nucléaires.

Les conteneurs d'échantillons expérimentaux utilisent généralement des systèmes à faible activation en tungstène-nickel-cuivre ou tungstène-nickel-fer ultra-purs. L'épaisseur de la paroi au niveau de la fenêtre d'incidence est précisément réduite afin de ne conserver que la résistance structurelle nécessaire. La sortie est équipée de plusieurs couches de feuilles de dégradation en alliage de tungstène rapidement remplaçables, d'une couche de modulation en polyéthylène contenant du bore et d'absorbants de cadmium/gadolinium, permettant un contrôle précis des débits d'énergie et de flux sur une large plage. L'ensemble de la cavité interne est poli miroir et revêtu de carbone amorphe ou de nitrure de bore pour empêcher l'adhérence de l'échantillon et supprimer la contamination par les électrons secondaires et la pulvérisation cathodique. Le système d'étanchéité utilise des brides métalliques à arêtes vives ou des joints permanents à faisceau d'électrons pour garantir un environnement ultra-vide et exempt d'oxygène. Certaines expériences extrêmement propres nécessitent également le dégazage et l'étuvage complets du conteneur à plusieurs centaines de degrés Celsius dans un four à vide poussé afin d'éliminer complètement l'hydrogène, le carbone et les gaz adsorbés résiduels.

de tungstène ont permis de réduire considérablement le bruit de fond des expériences de physique nucléaire, améliorant ainsi la précision des mesures des sections efficaces des isotopes rares, des paramètres de résonance et des voies de désintégration faibles. Elles sont devenues un élément essentiel des spectromètres de diffusion de neutrons, des spectromètres de rétrodiffusion temporelle, des recherches fondamentales sur les réactions astrophysiques nucléaires et de la mise à jour des bases de données nucléaires internationales.

#### **5.6.6 Application des boîtiers de protection en alliage de tungstène personnalisés pour des environnements spéciaux**

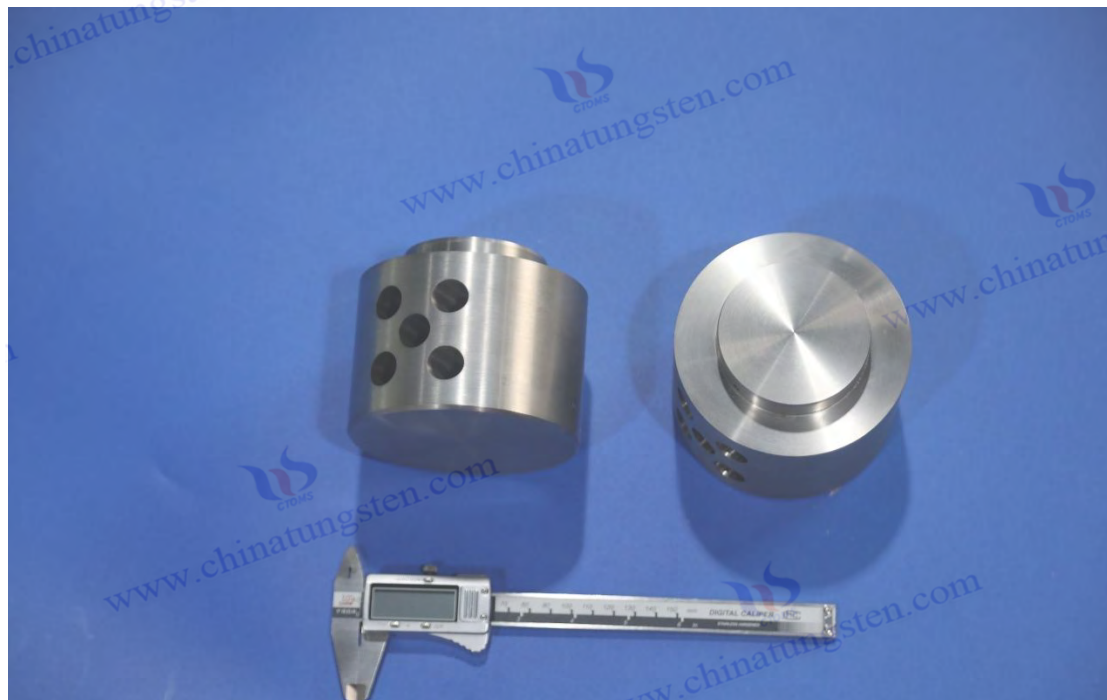
Les conteneurs de blindage en alliage de tungstène conçus sur mesure sont destinés aux limites les plus extrêmes des activités scientifiques et d'ingénierie humaines, couvrant des applications telles que les environnements sous-marins profonds (à des dizaines de milliers de mètres), les calottes glaciaires polaires, les chambres d'accélérateurs à vide poussé, les diagnostics de plasma à ultra-haute température, les intérieurs de réfrigérateurs à dilution à ultra-basse température, le stockage temporaire de liquides de déchets hautement corrosifs et hautement radioactifs avant leur élimination géologique, et les besoins de confinement des radiations dans des conditions extrêmes complexes.

La station de détection des neutrinos en eaux profondes et de surveillance de la radioactivité des fonds marins utilise un conteneur de blindage à parois épaisses en tungstène-nickel-fer résistant aux hautes pressions, associé à une enveloppe en alliage de titane et à une interface étanche à fibres optiques sous-marines. Ce dispositif est capable de contenir des détecteurs au germanium de haute pureté et des sources d'étalonnage à des profondeurs de plusieurs dizaines de milliers de mètres pendant des décennies. Le réseau de détection des rayons cosmiques de la calotte glaciaire polaire utilise un conteneur de blindage

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

en alliage de tungstène ultra-pur, revêtu de plusieurs couches d'isolation pour très basses températures et de revêtements antigivre afin de garantir une efficacité de blindage constante même dans des environnements extrêmement froids. Le blindage local de l'anneau de stockage à ultra-vide et de la ligne de faisceau laser à électrons libres utilise un conteneur emboîté en alliage de tungstène brasé sous vide et plaqué or pour éviter le soudage à froid. Il en résulte un taux de dégazage interne extrêmement faible, permettant un fonctionnement à long terme dans des systèmes à ultra-vide sans contamination du faisceau. Le système de diagnostic de fusion à ultra-haute température utilise un conteneur composite en alliage de tungstène et molybdène-lanthane ou tungstène-rhénium, capable de contenir des cristaux de détection de neutrons et de rayons X durs dans des environnements où les températures instantanées dépassent plusieurs milliers de degrés Celsius. Le réfrigérateur à dilution pour l'informatique quantique et la détection de matière noire à ultra-basse température utilise un conteneur de blindage miniature en alliage de tungstène, combiné à une couche interne de niobium supraconducteur et de cuivre de haute pureté, permettant une interception quasi complète des particules secondaires issues des rayons cosmiques.

Avant leur stockage géologique, les conteneurs de déchets radioactifs de haute activité, liquides ou solides, sont revêtus d'un alliage tungstène-nickel-cuivre, avec une doublure intérieure en alliage Hastelloy et un revêtement extérieur multicouche en fluoroplastique. Cette structure assure une durée de vie de confinement chimique et radiologique supérieure à 100 ans. L'utilisation sur mesure de ces conteneurs de blindage en alliage de tungstène dans ces environnements spécifiques permet de mener des explorations scientifiques et des activités d'exploitation des ressources radioactives dans les conditions naturelles et techniques les plus extrêmes, élargissant considérablement le champ d'application des technologies nucléaires et de la radioprotection. Cette solution est devenue indispensable pour le confinement et le blindage lors d'expériences en milieu terrestre, sous-marin et spatial, ainsi que pour des expériences de physique extrême.



CTIA GROUP LTD Boîtier de blindage en alliage de tungstène

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

## Chapitre 6 : Sélection, utilisation et entretien des réservoirs de protection en alliage de tungstène

### 6.1 Méthode de sélection scientifique des boîtiers de protection en alliage de tungstène

Les conteneurs de blindage en alliage de tungstène ont connu une évolution radicale : l'approche traditionnelle « plus c'est épais, mieux c'est, plus c'est lourd, plus c'est sûr » a été remplacée par un processus de décision systématique, quantitatif et en boucle fermée, basé sur le spectre de la source, les contraintes du scénario, les exigences réglementaires et le coût total du cycle de vie. Seule une sélection scientifique permet d'atteindre un blindage optimal, un poids minimal, une durée de vie maximale et un coût total minimal.

#### 6.1.1 Critères de sélection des boîtiers de protection en alliage de tungstène en fonction des caractéristiques de rayonnement

Les caractéristiques de rayonnement constituent le point de départ et l'objectif ultime du choix des conteneurs de blindage en alliage de tungstène. Il est essentiel de caractériser précisément les sources de rayonnement sur l'ensemble du spectre, à tous les niveaux d'énergie et dans le temps.

Premièrement, il convient d'identifier clairement le type et la distribution énergétique du rayonnement : s'agit-il d'un rayonnement gamma pur, d'un rayonnement mixte gamma-neutron ou d'un rayonnement complexe accompagné de surfaces  $\alpha/\beta$  ? Est-ce du cobalt-60 ou du césium-137 de haute énergie, ou de l'iode-125 ou de l'américium-241 de basse énergie ? Observe-t-on un rayonnement secondaire significatif et des rayons X caractéristiques ? Deuxièmement, il faut déterminer la courbe d'activité en fonction du temps : s'agit-il d'un médicament de médecine nucléaire à courte période radioactive, d'une source de détection de défauts à décroissance exponentielle ou de déchets de haute activité et de combustible usé à longue durée de vie ? Troisièmement, il faut évaluer la distribution géométrique : s'agit-il d'une source ponctuelle, d'une source surfacique, d'une source volumique, d'un faisceau directionnel ou d'une diffusion omnidirectionnelle.

Sur cette base, une relation complète entre le terme source, l'épaisseur de paroi, le débit de dose externe, le poids et le coût a été établie par des calculs de transport de rayons Monte Carlo. Ceci a permis de déterminer l'épaisseur minimale de l'alliage de tungstène pour respecter les limites réglementaires. De plus, en tenant compte des exigences relatives à la couche d'absorption des neutrons, au revêtement sacrificiel et à la fenêtre de collimation, des nuances de matériaux et des schémas structurels préliminaires ont été élaborés.

#### 6.1.2 Critères de sélection clés des boîtiers de protection en alliage de tungstène en fonction des scénarios d'application

Un même terme source peut correspondre à des types de réservoirs optimaux totalement différents selon les scénarios. Le scénario d'utilisation est une contrainte essentielle qui détermine la forme structurelle, l'intégration fonctionnelle et l'interaction homme-machine.

#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

Pour les enceintes chaudes fixes, une construction quasi-finie, une étanchéité par soudure permanente et plusieurs bouchons redondants sont privilégiés, garantissant un fonctionnement sans entretien pendant toute la durée de vie et un confinement maximal. Pour les applications de médecine nucléaire portables, un poids minimal, une ouverture rapide d'une seule main et des surfaces de miroir facilement décontaminables sont requis. La détection de défauts en milieu industriel privilégie l'alignement directionnel, les fenêtres rotatives et la résistance aux vibrations. Les conteneurs de transport doivent être conformes aux spécifications AIEA de type A/B/C, résister à des chutes de neuf mètres et être ignifugés. Le stockage des déchets privilégie un volume maximal, une durée de vie maximale et un fonctionnement sans surveillance. Parallèlement, la fréquence d'utilisation, les méthodes de décontamination et de transport, les contraintes d'espace, les niveaux de propreté, la compatibilité magnétique et de stérilisation, ainsi que les filières de recyclage en fin de vie doivent être étudiés de manière exhaustive. Par exemple, les salles PET-CT exigent des propriétés amagnétiques complètes et des surfaces autoclavables ; les conteneurs de détection de défauts pour plateformes offshore doivent résister aux embruns salins et à la contamination par les hydrocarbures ; et les conteneurs de mesure du bruit de fond pour laboratoires souterrains requièrent des matériaux ultra-purs à faible activation et sans revêtements volatils. La sélection finale doit, sous réserve du respect des normes de protection contre les radiations, traduire toutes les contraintes du scénario en solutions spécifiques pour la structure, les matériaux, le traitement de surface et les interfaces fonctionnelles afin de former une solution unique.

### 6.1.3 Vérification de la sélection des boîtiers blindés en alliage de tungstène selon les normes industrielles

Une fois le choix d'un réservoir de protection en alliage de tungstène officiellement finalisé, il doit faire l'objet d'une vérification physique complète, conformément aux normes et réglementations en vigueur. Il s'agit de l'étape finale, du passage de la conformité théorique à l'utilisation pratique.

Dans le domaine de la médecine nucléaire, les exigences d'enregistrement des dispositifs médicaux et les annexes des BPF de l'Administration nationale des produits médicaux sont respectées. Les conteneurs finis doivent réussir les tests de débit de dose à la source réelle, la validation aseptique, les tests de biocompatibilité et de stabilité au transport. La détection des défauts industriels et les essais non destructifs sont conformes aux normes ISO 3999, GB/T 1933 et EN 14784, et les conteneurs sont validés par des tests de chute, d'empilage, de flamme et d'étanchéité à la source réelle. Les conteneurs de transport respectent scrupuleusement les spécifications IAEA SSR-6 et TS-R-1 et subissent une série complète d'essais de type, incluant une chute libre de neuf mètres, une perforation, un test à la flamme à 800 °C pendant 30 minutes et une immersion. Les conteneurs pour déchets et en milieu géologique sont conformes à la norme nationale GB 14500 et aux exigences IAEA SSG-23 et subissent des tests d'immersion à long terme, de vieillissement sous irradiation et de validation de confinement. Les conteneurs pour la recherche scientifique et les environnements spéciaux font l'objet d'une validation de compatibilité personnalisée pour la ventilation sous vide, la cryogénie, les hautes pressions sous-marines ou les champs magnétiques intenses, conformément à l'accord technique du projet.

Le processus de vérification doit être mené conjointement par un organisme tiers qualifié et l'utilisateur, et tous les enregistrements originaux, les photos et vidéos de mesures, ainsi que les données d'étalonnage

#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT



de la source doivent être archivés de manière permanente. Ce n'est que lorsque le débit de dose en surface externe mesuré, la distribution de l'angle de fuite, l'intégrité des gouttes et les limites réglementaires sont tous respectés, et que des marges raisonnables sont admises, que le schéma de sélection peut être formellement formalisé en plans, processus et conditions techniques d'approvisionnement, et passer à la phase de production en série.

La méthode de sélection scientifique en trois étapes – calcul des caractéristiques de rayonnement, respect des contraintes du scénario et vérification physique selon les normes industrielles – est un processus indispensable et interdépendant, devenu une procédure obligatoire pour les principaux centres de médecine nucléaire, les usines d'isotopes, les entreprises de contrôle qualité et les instituts aérospatiaux du monde entier lors de l'acquisition de conteneurs de blindage en alliage de tungstène. Elle garantit que chaque conteneur de blindage en alliage de tungstène quittant l'usine est non pas « assez bien », mais « parfaitement conforme ».

## **6.2 Procédures de sécurité d'exploitation des réservoirs blindés en alliage de tungstène**

Bien que les conteneurs de blindage en alliage de tungstène présentent une marge de sécurité extrêmement élevée, leur utilisation demeure la phase la plus sujette aux erreurs humaines dans la chaîne de radioprotection. Tout manquement aux procédures d'utilisation peut entraîner un surdosage pour le personnel, une source radioactive incontrôlée ou endommager le conteneur. Il est donc essentiel d'établir des procédures d'utilisation de sécurité obligatoires couvrant l'ensemble du processus, tout le personnel et tous les enregistrements.

### **6.2.1 Procédures d'exploitation de base et spécifications des réservoirs blindés en alliage de tungstène**

Les opérations de base comprennent l'ouverture du couvercle, le chargement de la source, le prélèvement de la source, la fermeture du couvercle, le nettoyage, les contrôles d'état et les inspections quotidiennes, et les principes fondamentaux « deux personnes, deux verrous, une confirmation par étape et des enregistrements traçables » doivent être strictement respectés.

Avant d'ouvrir le couvercle, trois vérifications doivent être effectuées : confirmation de la position de la source (s'assurer qu'elle se trouve dans la zone de sécurité), confirmation du débit de dose (s'assurer que la surface extérieure est dans la plage de bruit de fond) et vérification de l'état du verrouillage. L'ouverture du couvercle doit être réalisée à l'aide d'outils spécifiques ou d'un bras robotisé ; toute manipulation par une seule personne, toute tentative d'ouverture forcée du couvercle et toute insertion ou retrait de la source avant la fermeture complète du couvercle sont strictement interdits. Le chargement et le déchargement de la source doivent être effectués dans une enceinte chauffée dédiée, sur une table d'opération blindée ou dans un convoyeur de sources . Les opérateurs doivent porter des dosimètres individuels et des alarmes électroniques pendant toute la durée de l'opération. Immédiatement après la fermeture du couvercle, un nouveau test de débit de dose, une inspection visuelle du joint et le verrouillage des dispositifs de sécurité doivent être effectués. La valeur du débit de dose, la durée de l'opération, le nom de l'opérateur, du vérificateur et le numéro unique du réservoir doivent être enregistrés.

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



Les opérations de décontamination doivent être effectuées dans une salle dédiée ou sur une table de décontamination, en utilisant les produits de décontamination prescrits et les lingettes jetables. Tout contact direct avec le corps en alliage de tungstène, notamment avec de la laine d'acier, du papier de verre ou des acides forts, est strictement interdit. La contamination de surface doit être contrôlée avant et après chaque utilisation. Si la contamination dépasse les seuils acceptables, la zone doit être immédiatement isolée et la procédure de contrôle de la propagation de la contamination mise en œuvre. Tous les enregistrements d'opérations doivent être téléchargés en temps réel dans le système d'information de gestion de la radioprotection. Toute opération non signée, non vérifiée ou non consignée est considérée comme invalide.

### 6.2.2 Exigences de sécurité pour le déplacement et le transport des conteneurs blindés en alliage de tungstène

La partie présentant le risque de rayonnement le plus élevé lors de l'utilisation de conteneurs de blindage en alliage de tungstène, et cinq exigences obligatoires doivent être mises en œuvre : « itinéraire fixe, outils dédiés, surveillance en temps réel, double responsabilité et préparation aux situations d'urgence ». Les conteneurs portables doivent être transportés à l'aide de poignées ou de chariots ergonomiques ; la manutention par une seule personne de conteneurs dépassant le poids spécifié est strictement interdite. Les conteneurs de grande taille doivent être équipés d'anneaux de levage homologués pour la charge et d'un matériel de levage spécialisé. Avant le levage, les élingues doivent être inspectées, le débit de dose au point de levage mesuré et une zone d'exclusion radiologique délimitée sous le conteneur doit être établie. Les itinéraires de transport doivent être déclarés à l'avance et clairement signalés par des panneaux d'avertissement de radioactivité. Des dosimètres portables et des talkies-walkies doivent être disponibles le long du trajet pour signaler en temps réel la position du conteneur et le niveau de dose. Le transport interne à l'hôpital doit éviter les couloirs publics et les heures de pointe des ascenseurs. Le transport extérieur et routier doit utiliser des conteneurs et des véhicules de transport spécialisés conformes aux spécifications de type B(U) ou AF. Les conducteurs et les accompagnateurs doivent être titulaires d'un certificat de formation en radioprotection.

Durant toute la durée du processus, il est strictement interdit de laisser la citerne à découvert dans un espace ouvert non protégé pendant plus longtemps que la durée prescrite, de la mélanger à d'autres marchandises ou d'apposer des marquages non fixés sur sa surface extérieure. À l'arrivée à destination, vérifiez immédiatement le débit de dosage et inspectez l'intégrité de la citerne. En cas d'anomalie, isolez immédiatement la zone et déclenchez la procédure d'urgence.

### 6.2.3 Intervention d'urgence et dépannage des réservoirs blindés en alliage de tungstène

Même s'il est quasiment impossible de contenir une défaillance du boîtier de blindage en alliage de tungstène lui-même, il est néanmoins nécessaire de développer des procédures d'intervention d'urgence et de gestion des pannes à plusieurs niveaux pour les scénarios les plus défavorables afin de garantir que toute anomalie puisse être maîtrisée dans les plus brefs délais.

Les anomalies courantes sont divisées en trois catégories :

#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

1. En cas de chute ou d'impact d'une cuve : établir immédiatement une zone d'exclusion, utiliser un dosimètre à long manche pour effectuer des mesures à distance et, si le débit de dose sur la surface extérieure augmente significativement, interdire l'accès à toute personne. Utiliser un bras robotisé ou un robot pour déplacer la cuve vers une fosse blindée de secours ou un conteneur d'urgence.
2. Si le couvercle est bloqué ou si le joint est défectueux : immobilisez le réservoir et ne forcez pas l'ouverture du couvercle. Utilisez une protection ou une couverture de plomb pour recouvrir temporairement le réservoir et contactez le fabricant afin qu'il dépêche une équipe de professionnels équipés d'outils spécifiques pour intervenir sur place.
3. Propagation de la contamination de surface : Isoler immédiatement la zone, porter des vêtements de protection complets, utiliser des décontaminants spécialisés et des dispositifs d'aspiration pour la décontamination localisée, placer les matériaux contaminés dans des sacs à déchets spécialisés et procéder ensuite à un dépistage de la contamination corporelle totale et à une surveillance du débit de dose environnemental.

Toute intervention d'urgence doit être menée sous la responsabilité du responsable de la radioprotection, avec activation du formulaire de déclaration d'urgence et remontée des informations à la hiérarchie. L'analyse des causes profondes et les mesures correctives/préventives doivent être réalisées dans les 24 heures. Au moins un exercice complet de simulation d'urgence doit être organisé chaque année afin de garantir que chaque opérateur puisse enfiler correctement son équipement de sécurité en moins de 30 secondes, établir une zone d'exclusion en moins d'une minute et effectuer l'isolement initial en moins de trois minutes.

Ce n'est qu'en intégrant les procédures opérationnelles de base, les exigences de transfert mobile et les mesures d'intervention d'urgence dans des systèmes obligatoires et en menant des formations et des évaluations régulières que les hautes performances de sécurité des réservoirs de protection en alliage de tungstène pourront véritablement se traduire par zéro accident, zéro surdosage et zéro pollution, permettant ainsi de réaliser un cycle complet allant des « bons réservoirs » à une « bonne utilisation ».

### **6.3 Techniques d'entretien quotidien et de prolongation de la durée de vie des cartouches blindées en alliage de tungstène**

La coque blindée en alliage de tungstène du réservoir peut durer des décennies, voire des centaines d'années, mais les joints, les revêtements, les mécanismes d'assemblage et les accessoires fonctionnels ont une durée de vie limitée. Seule la mise en place d'un système de maintenance quotidienne rigoureux, systématique et traçable permet au réservoir d'atteindre un état optimal, garantissant une durabilité exceptionnelle et des performances optimales tout au long de sa durée de vie.

#### **6.3.1 Méthodes de nettoyage et d'entretien courants des réservoirs de protection en alliage de tungstène**

Les cuves de blindage en alliage de tungstène sont fabriquées selon les principes « doux, standardisé, documenté et traçable ». L'objectif principal est d'éliminer complètement la contamination radioactive

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

de surface et les résidus chimiques sans endommager le corps en alliage de tungstène ni les revêtements fonctionnels.

Le nettoyage quotidien utilise une méthode en trois étapes :

1. Tout d'abord, utilisez un chiffon jetable non pelucheux humidifié avec un détergent neutre ou légèrement alcalin pour essuyer toute la surface en effectuant des mouvements doux, unidirectionnels et non répétitifs ;
2. Essuyez à nouveau avec de l'alcool médical à 70 % ou une solution de peroxyde d'hydrogène à faible concentration pour éliminer tout résidu de détergent ;
3. Enfin, rincez abondamment à l'eau ultrapure et à l'aide d'un chiffon non pelucheux, puis laissez sécher à l'air libre ou séchez à l'air chaud à basse température. L'utilisation d'eau de Javel, de laine d'acier, de solvants organiques, d'acides forts ou de bases fortes est strictement interdite en contact direct avec le corps en alliage de tungstène. Après le nettoyage, toute contamination de surface doit être essuyée et un échantillon prélevé immédiatement pour contrôle ; le produit ne peut être remis à son emplacement d'origine qu'après confirmation de l'absence de transfert de contamination.

Les principaux points de maintenance comprennent :

- graisse silicone résistante aux radiations ou lubrifiant sec à base de graphite sur les surfaces d'étanchéité, les rainures labyrinthiques, les loquets et les charnières, mensuellement ;
- Les cosses doivent être inspectées tous les trimestres pour vérifier leur aspect et leur couple de serrage.
- Une inspection visuelle complète de la surface du réservoir doit être effectuée annuellement. Toute rayure ou perte de brillance localisée doit être immédiatement consignée et une procédure de réparation locale mise en œuvre. Tous les produits de nettoyage, lubrifiants et chiffons d'essuyage doivent être utilisés exclusivement pour ce réservoir et sont à usage unique. Après utilisation, ils doivent être éliminés comme déchets radioactifs.

### 6.3.2 Inspection périodique et étalonnage des performances des boîtiers de protection en alliage de tungstène

Le corps en alliage de tungstène ne présente pratiquement aucune dégradation de performance, mais le système de blindage global nécessite tout de même des tests réguliers pour garantir que son fonctionnement reste sous contrôle.

Le cycle de test est divisé en trois niveaux : mensuel, trimestriel et annuel.

- Inspection mensuelle : balayage panoramique du débit de dose de la surface externe, inspection visuelle et contrôle de la contamination par essuyage de la surface d'étanchéité, et test de la fonction de verrouillage et d'interverrouillage ;

#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

- Inspection trimestrielle : mesure précise de l'épaisseur de la paroi par ultrasons (en se concentrant sur la zone d'épaisseur minimale de la paroi et le fond du trou), remesure de l'adhérence du revêtement de surface et de l'angle de contact, et étalonnage de l'écran d'affichage du débit de dose et des fonctions de l'étiquette électronique ;
- Inspection annuelle : étalonnage de la source réelle (à l'aide d'une source standard de cobalt-60 ou de césium-137 pour mesurer le débit de dose et la distribution de l'angle de fuite sur la surface extérieure à une distance spécifiée), spectrométrie de masse à l'hélium pour la détection globale des fuites et contrôle d'intégrité des coussins tampons de chute et des systèmes d'absorption des chocs.

Tous les tests doivent être effectués à l'aide d'instruments métrologiquement étalonnés et réalisés par deux personnes certifiées en radioprotection. Les données brutes doivent être téléchargées en temps réel sur le système de gestion de la radioprotection. Si un indicateur dépasse de 80 % la valeur de référence, le système doit être immédiatement déclassé et des réparations spéciales doivent être organisées ; s'il est inférieur à 60 %, le système doit être isolé et mis hors service.

### 6.3.3 Remplacement et entretien des composants vulnérables des réservoirs de protection en alliage de tungstène

Le conteneur de protection en alliage de tungstène comprend principalement la bague d'étanchéité, le revêtement fonctionnel, le ressort de verrouillage, l'écran d'affichage du débit de dose, le coussinet amortisseur, la doublure intérieure jetable et l'étiquette électronique. L'entretien de ces éléments repose sur une stratégie combinant remplacement préventif et remplacement conditionnel.

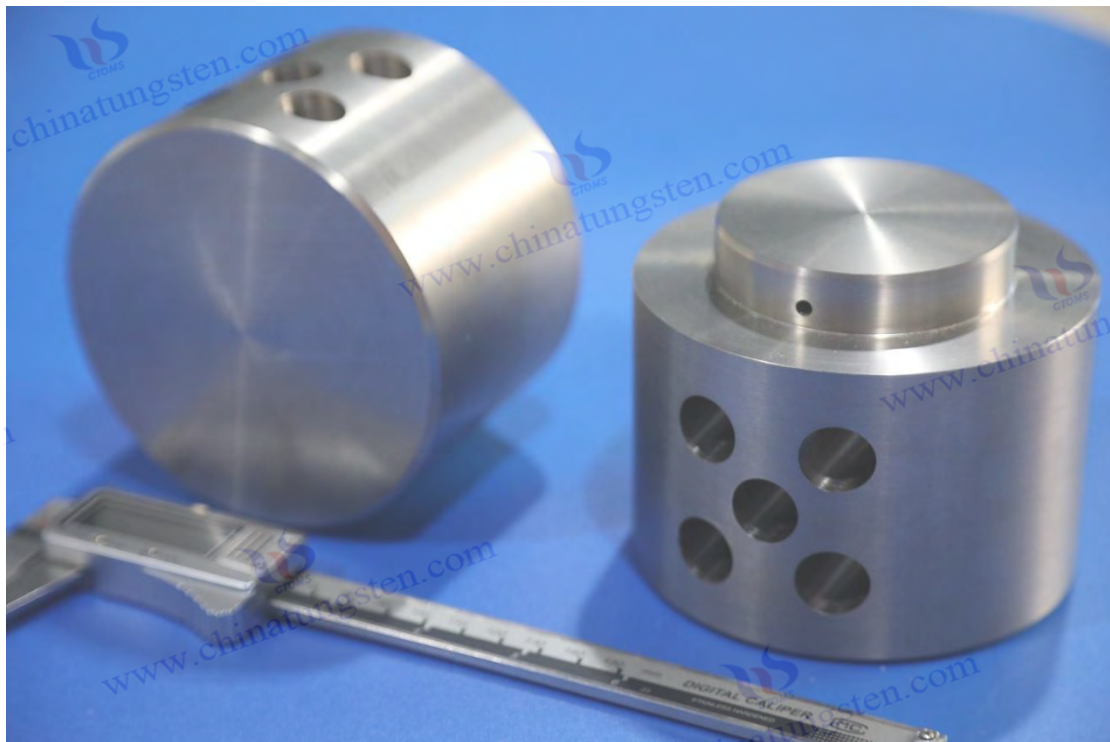
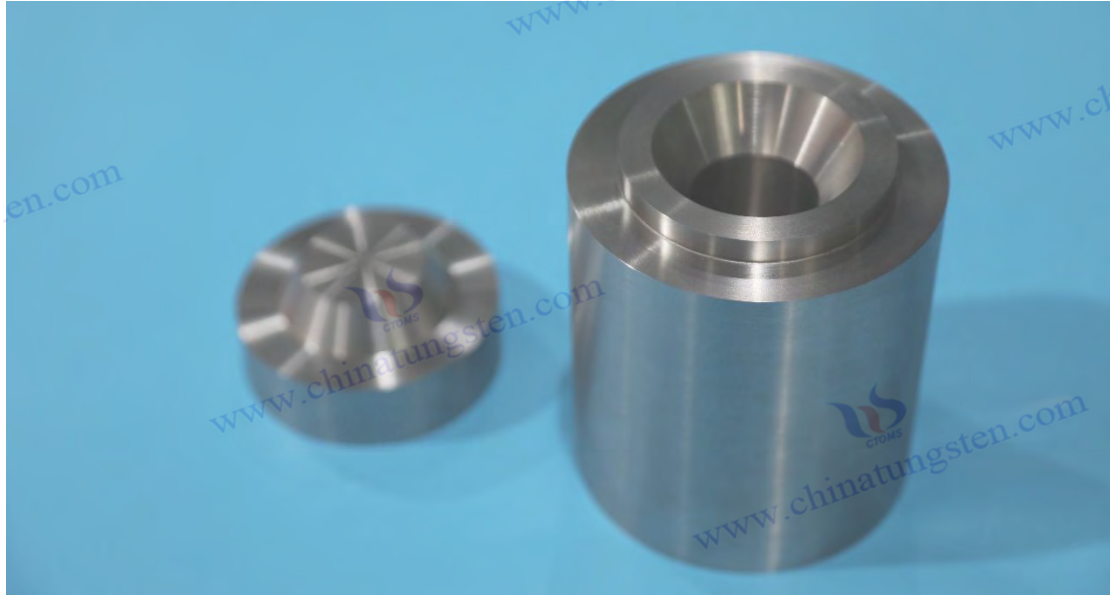
Les joints d'étanchéité (joints en C métalliques, joints toriques en caoutchouc fluoré, joints revêtus de PTFE) doivent être remplacés préventivement tous les 1 à 3 ans ou après 1 000 à 3 000 cycles d'ouverture et de fermeture cumulés. Le remplacement doit être effectué en salle blanche et un test d'étanchéité par spectrométrie de masse à l'hélium doit être réalisé. Les revêtements fonctionnels (revêtements fluorés faciles à nettoyer, DLC, CrN) doivent être entièrement refaits par un fabricant spécialisé si de grandes surfaces sont rayées, si l'adhérence est réduite ou si l'angle de contact est significativement augmenté ; les retouches sur site sont interdites. Les serrures, charnières, ressorts et mécanismes d'ouverture rapide doivent être lubrifiés annuellement ; en cas de blocage ou de retour lent, l'ensemble doit être immédiatement remplacé par des pièces de rechange d'origine. Les afficheurs de débit de dosage, les étiquettes électroniques NFC/RFID et les modules de batterie doivent être remplacés tous les cinq ans ou lorsque le niveau de la batterie est inférieur à 20 % afin de garantir le bon fonctionnement des fonctions d'identification et de surveillance d'activité. Les revêtements intérieurs jetables et les revêtements sacrificiels doivent être retirés de l'échangeur de chaleur et remplacés après saturation par la contamination ; les anciens revêtements intérieurs doivent être éliminés comme déchets faiblement à moyennement radioactifs.

Toutes les pièces sensibles font l'objet d'un système d'approvisionnement et de remplacement qui garantit « des pièces d'origine constructeur, des codes uniques et des lots traçables ». Les dossiers de remplacement sont archivés avec les anciennes pièces pendant plus de dix ans.

#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT



Grâce à un nettoyage et un entretien rigoureux, des tests et un étalonnage réguliers, ainsi qu'au remplacement préventif des pièces vulnérables, les réservoirs de protection en alliage de tungstène peuvent facilement atteindre l'état idéal d'un corps principal sans entretien à vie et de composants fonctionnels perpétuellement neufs, prolongeant ainsi efficacement la durée de vie réelle de plusieurs décennies théoriques à plus d'un demi-siècle, réalisant véritablement un « investissement unique, une tranquillité d'esprit à vie ».



CTIA GROUP LTD Boîtier de blindage en alliage de tungstène

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

## CTIA GROUP LTD

### High-Density Tungsten Alloy Customization Service

CTIA GROUP LTD, a customization expert in high-density tungsten alloy design and production with 30 years of experience.

**Core advantages:** 30 years of experience: deeply familiar with tungsten alloy production, mature technology.

**Precision customization:** support high density (17-19 g/cm<sup>3</sup>), special performance, complex structure, super large and very small parts design and production.

**Quality cost:** optimized design, optimal mold and processing mode, excellent cost performance.

**Advanced capabilities:** advanced production equipment, RMI, ISO 9001 certification.

#### 100,000+ customers

Widely involved, covering aerospace, military industry, medical equipment, energy industry, sports and entertainment and other fields.

#### Service commitment

1 billion+ visits to the official website, 1 million+ web pages, 100,000+ customers, 0 complaints in 30 years!

Contact us

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

Tel: +86 592 5129696

Official website: [www.tungsten-alloy.com](http://www.tungsten-alloy.com)



#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

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

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

## Chapitre 7 Comparaison des boîtes de protection en alliage de tungstène avec d'autres boîtes de protection

### 7.1 Comparaison des boîtes de protection en alliage de tungstène et des boîtes de protection en alliage de plomb

Le plomb et ses alliages (notamment plomb-antimoine, plomb-étain, plomb-bismuth, etc.) ont longtemps été considérés comme les matériaux de prédilection pour le blindage contre les rayons gamma, mais leurs défauts intrinsèques sont de plus en plus manifestes dans les systèmes de radioprotection modernes de haute qualité. [Les conteneurs de blindage en alliage de tungstène](#) et ceux en alliage de plomb présentent une différence générationnelle systématique et irréversible en termes de propriétés des matériaux, de performances et de durée de vie.

#### 7.1.1 Comparaison des performances des boîtes de blindage en alliage de tungstène et des boîtes de blindage en alliage de plomb (efficacité de blindage, densité, etc.)

Les alliages de tungstène et les alliages de plomb appartiennent tous deux au système à numéro atomique élevé en termes de capacité d'atténuation des rayons gamma, mais les alliages de tungstène présentent un avantage global en termes d'efficacité volumétrique, de propriétés mécaniques, de stabilité sous irradiation et de fidélité géométrique. Les alliages de tungstène présentent une densité macroscopique nettement supérieure à celle du plomb pur et de la plupart des alliages de plomb, ce qui permet de réduire les dimensions globales et l'épaisseur des parois à masse égale, diminuant ainsi considérablement le poids et l'encombrement des boîtes. Le squelette continu de tungstène et la phase liante haute résistance des alliages de tungstène leur confèrent une limite d'élasticité et une résistance au fluage extrêmement élevées, permettant l'usinage direct de labyrinthes complexes, de trous borgnes profonds et de structures à fond mince. À l'inverse, les alliages de plomb ne peuvent être fabriqués que par moulage ou sous forme de pièces simples à parois épaisses, ce qui rend difficile l'intégration de couvercles à ouverture rapide et un alignement précis.

Sous irradiation prolongée, les alliages de plomb sont très sensibles au gonflement, à la liquéfaction des joints de grains et au fluage, ce qui entraîne un amincissement des parois, des défaillances d'étanchéité et la formation de canaux de fuite. Les alliages de tungstène, quant à eux, présentent une excellente résistance aux radiations : leur microstructure et leurs dimensions restent inchangées pendant des décennies. À haute température, les alliages de plomb se ramollissent et se déforment bien en dessous du point de fusion des alliages de tungstène, tandis que ces derniers conservent leur intégrité structurelle pendant de longues périodes à des centaines de degrés Celsius. Concernant la résistance à la corrosion superficielle, les alliages de plomb forment rapidement une couche d'oxyde peu adhérente et une couche de carbonate de plomb en milieu acide et humide, tandis que les alliages de tungstène possèdent un film de passivation dense, renforcé par des revêtements durs, qui résiste à une oxydation intense et à des nettoyages répétés sans altérer leur aspect lisse. En résumé, les conteneurs de blindage en alliage de tungstène surpassent les alliages de plomb à tous égards, notamment en termes d'efficacité du volume de blindage, de résistance structurelle, de stabilité sous irradiation et thermique, de précision géométrique

#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

et de confinement à long terme, ce qui en fait la seule approche technique réalisable pour les scénarios exigeants.

### 7.1.2 Comparaison du caractère écologique des réservoirs de protection en alliage de tungstène et des réservoirs de protection en alliage de plomb

Le plomb et ses alliages sont des métaux lourds toxiques clairement identifiés, présentant des risques importants pour l'environnement et la santé tout au long de leur cycle de vie, de la production à l'élimination, en passant par l'utilisation et la décontamination. Les alliages de tungstène, quant à eux, permettent un cycle complet et écologique grâce à la nature même du matériau.

Les vapeurs et les sels de plomb solubles se dégagent lors des nettoyages répétés. Une exposition prolongée à ces substances peut entraîner un saturnisme chronique chez les opérateurs, et le plomb peut s'accumuler dans l'environnement et pénétrer la chaîne alimentaire, provoquant une pollution permanente. Les conteneurs en plomb mis au rebut ne peuvent être éliminés que comme déchets dangereux dans des décharges spécialisées ou par des procédés de recyclage du plomb coûteux, qui génèrent eux-mêmes une pollution secondaire due aux vapeurs et aux scories de plomb. Les alliages de tungstène, en revanche, sont totalement exempts de métaux lourds réglementés tels que le plomb, le cadmium et le mercure. Le nettoyage de surface ne génère qu'une très faible quantité de liquide radioactif ordinaire, sans risque de rejet de métaux lourds. Les conteneurs en alliage de tungstène mis au rebut peuvent être directement fondus et recyclés, avec un recyclage et une réutilisation à 100 % du tungstène et du liant nickel-fer/nickel-cuivre. Aucun traitement spécial des déchets dangereux n'est requis, ce qui permet d'atteindre une véritable économie d'atomes et le zéro déchet.

Au niveau réglementaire, les directives européennes RoHS et REACH, ainsi que la liste chinoise des déchets dangereux, imposent des restrictions de plus en plus strictes aux produits de blindage contenant du plomb. Les alliages de tungstène, quant à eux, répondent pleinement aux normes environnementales et de biosécurité les plus rigoureuses, ce qui leur permet d'être utilisés librement dans les zones stériles des hôpitaux, les salles blanches et sur les marchés d'exportation. Le statut environnemental des conteneurs de blindage en alliage de tungstène a évolué, passant de « sans danger » à « ressources recyclables », mettant ainsi fin aux responsabilités environnementales à long terme héritées de l'ère du blindage au plomb et représentant la voie royale vers une conception plus écologique des matériaux de protection contre les rayonnements.

### 7.1.3 Comparaison des scénarios d'application entre les boîtiers de protection en alliage de tungstène et les boîtiers de protection en alliage de plomb

Les limites applicables entre les conteneurs de blindage en alliage de plomb et les conteneurs de blindage en alliage de tungstène ont formé une ligne de partage des eaux claire et quasiment sans chevauchement.

Les alliages de plomb restent cantonnés à un nombre très limité d'applications, temporaires, ponctuelles ou extrêmement rares : stockage temporaire de sources de détection de défauts à faible activité dans le cadre de locations de courte durée, diagraphies géologiques ponctuelles sur le terrain, démonstrations

#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT



pédagogiques avec des budgets très restreints et maintenance d'équipements anciens dans certains pays en développement où leur remplacement n'est pas encore achevé. Ces applications présentent des caractéristiques communes : faible fréquence d'utilisation, exigences de décontamination minimales, faible niveau de spécialisation du personnel, insensibilité au poids et au volume, et absence de prise en compte des conséquences environnementales à long terme.

Les cartouches de blindage en alliage de tungstène sont parfaitement adaptées à toutes les applications haut de gamme, longue durée de vie, haute fréquence et aux contextes réglementaires les plus stricts :

- L'ensemble de la chaîne de diagnostic et de traitement en médecine nucléaire (salle TEP-TDM, salle thermique, salle de traitement) ;
- chambre chaude de production et de conditionnement d'isotopes ;
- Contrôle radiographique industriel à haut débit et contrôle non destructif en ligne ;
- Stockage intermédiaire, transport et stockage temporaire du combustible usé et des déchets radioactifs de haute activité ;
- Essais de rayonnement aérospatial et blindage local en orbite ;
- Salles blanches pour semi-conducteurs et laboratoires à faible bruit de fond pour instruments de précision ;
- Toutes les installations modernes de radioprotection qui sont non magnétiques, capables de stérilisation à haute température et haute pression, capables de décontamination en profondeur et entièrement recyclables.

Dès qu'un scénario entre dans l'une des catégories suivantes : fonctionnement robotisé ou manuel fréquent, utilisation répétée de détergents oxydants puissants, compatibilité avec les salles d'IRM, exigences de propreté, durée de vie supérieure à dix ans ou élimination progressive obligatoire des produits en plomb par la réglementation, les alliages de plomb sont totalement exclus et les alliages de tungstène deviennent la seule solution conforme et techniquement réalisable.

#### **7.1.4 Comparaison du coût total du cycle de vie des réservoirs de protection en alliage de tungstène et des réservoirs de protection en alliage de plomb**

L'opinion traditionnelle considère que les alliages de plomb ont un faible prix d'achat initial, mais dans le cadre strict de la comptabilité du cycle de vie (CCV), les cartouches de blindage en alliage de tungstène ont démontré un avantage considérable.

Bien que le coût d'achat initial des boîtes en alliage de plomb soit faible, les coûts cachés et explicites ultérieurs s'accumulent rapidement :

- Le fonds de réserve destiné à la protection contre la poussière de plomb, à la surveillance du taux de plomb dans le sang et à l'indemnisation des maladies professionnelles doit être augmenté chaque année ;
- Chaque processus de décontamination nécessite une grande quantité d'équipements de protection jetables et engendre des coûts élevés d'élimination des déchets dangereux ;

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

- En moyenne, elles sont complètement mises au rebut tous les 5 à 8 ans en raison du fluage, de la corrosion ou de la saturation par la contamination, ce qui nécessite un rachat et le paiement des coûts de transport et de mise en décharge des déchets dangereux ;
- Les remplacements fréquents ont entraîné des pertes liées aux temps d'arrêt et une augmentation constante des coûts de formation du personnel.

de tungstène ne est relativement élevé, mais les coûts ultérieurs sont presque nuls.

- Le corps principal ne nécessite aucune réparation majeure pendant toute sa durée de vie, et le coût de remplacement des pièces d'usure courante telles que les joints est négligeable.
- L'élimination des taches ne nécessite qu'un simple essuyage, avec des coûts extrêmement faibles en consommables et en main-d'œuvre.
- La contamination de surface est facilement éliminée et pratiquement aucun déchet dangereux supplémentaire n'est généré ;
- Lorsqu'ils sont mis au rebut, les métaux précieux sont recyclés dans leur intégralité, ce qui peut même générer des bénéfices ;
- Avec très peu de remplacements, le taux de disponibilité des équipements avoisine les 100 %, ce qui engendre d'énormes avantages économiques indirects.

D'après les calculs de plusieurs centres de médecine nucléaire, usines d'isotopes et entreprises de contrôle qualité industriel de premier plan, le coût des conteneurs de blindage en alliage de tungstène atteint un point d'inflexion entre la 5<sup>e</sup> et la 7<sup>e</sup> année, chaque année supplémentaire de durée de vie se traduisant par un bénéfice net. Sur une période de plus de dix ans, le coût total de possession des conteneurs de blindage en alliage de tungstène ne représente que 40 % à 60 % de celui des systèmes en alliage de plomb, et cet avantage s'accroît avec l'allongement de leur durée de vie.

La conclusion est sans appel : dans tout contexte moderne de radioprotection exigeant fiabilité à long terme, respect de l'environnement et conformité réglementaire, les conteneurs de blindage en alliage de tungstène sont passés du statut d'« option haut de gamme » à celui de « seule option économique ». L'ère des conteneurs de blindage en alliage de plomb est définitivement révolue.

## 7.2 Comparaison entre les réservoirs de protection en alliage de tungstène et les réservoirs de protection en acier

en acier ordinaire et en acier inoxydable (notamment en acier au carbone, en acier au bore, en acier inoxydable à faible teneur en carbone, en acier inoxydable duplex, etc.) étaient autrefois largement utilisés pour le blindage grossier contre les rayons gamma et les neutrons de basse et moyenne énergie, en raison de leur faible coût et de leur facilité de mise en œuvre. Cependant, dans les systèmes de radioprotection modernes, exigeants et à longue durée de vie, les limitations inhérentes à leurs matériaux les rendent inadaptés aux exigences des scénarios critiques. Les conteneurs de blindage en alliage de tungstène et ceux en acier présentent des différences fondamentales en termes d'efficacité de blindage, de comportement mécanique et de durabilité environnementale.

### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

### 7.2.1 Comparaison des performances de blindage entre les conteneurs de blindage en alliage de tungstène et les conteneurs de blindage en acier

Les conteneurs de blindage en acier reposent principalement sur le numéro atomique et le coefficient d'absorption massique du fer pour l'atténuation des rayons gamma, tandis que les alliages de tungstène offrent un avantage exponentiel en termes d'efficacité de blindage volumétrique grâce au numéro atomique et à la densité extrêmement élevés du tungstène. À dimensions externes égales, les conteneurs en alliage de tungstène peuvent atténuer les rayons gamma de haute énergie à une fraction seulement de celle des conteneurs en acier ; pour un même effet de blindage, l'épaisseur de paroi des conteneurs en alliage de tungstène est également bien moindre que celle des conteneurs en acier, ce qui permet une réduction significative du poids et du volume. De ce fait, l'alliage de tungstène constitue la seule solution viable dans les situations où les contraintes d'espace et de poids sont strictes.

En matière de blindage neutronique, les conteneurs en acier nécessitent généralement un remplissage supplémentaire avec du polyéthylène boré, des plaques d'acier au bore ou du béton épais pour absorber les neutrons thermiques. Cependant, cette structure composite introduit inévitablement des interfaces, des joints et des hétérogénéités de densité, entraînant des fuites de neutrons et une amplification secondaire du rayonnement gamma. Les conteneurs en alliage de tungstène, quant à eux, permettent un blindage gamma-neutronique continu, sans interfaces ni zones de faiblesse, grâce à la combinaison de la capacité de modération neutronique du système tungstène-nickel-fer lui-même et d'inserts de borures ou d'oxydes de terres rares. Les conteneurs en acier sont très sensibles à la dégradation de leurs performances sous des champs de rayonnement mixte à flux élevé, en raison de la volatilisation de l'hydrogène, de la combustion du bore et du vieillissement des interfaces, tandis que l'efficacité de blindage des conteneurs en alliage de tungstène reste constante pendant des décennies.

les environnements à large spectre et à sources complexes, le blindage en acier ne permet qu'un blindage grossier par empilement de couches successives, tandis que le blindage en alliage de tungstène offre des conceptions de blindage précises et directionnellement contrôlables grâce à une épaisseur de paroi variable, une collimation intégrée et une insertion précise. Les boîtiers de blindage en acier sont devenus des produits transitoires pour les scénarios à faible activité, temporaires et nécessitant un grand volume, tandis que les boîtiers de blindage en alliage de tungstène sont devenus la seule solution technique pour un blindage haut de gamme, précis et durable.

### 7.2.2 Comparaison des propriétés mécaniques des réservoirs blindés en alliage de tungstène et des réservoirs blindés en acier

Bien que l'acier possède une résistance nominale élevée, son usinabilité et sa précision dimensionnelle sont fondamentalement limitées par les alésages borgnes à fort rapport d'aspect, les transitions à fond mince et parois épaisses, les labyrinthes complexes et les structures de levage intégrées nécessaires aux conteneurs de protection contre les radiations. Les réservoirs en acier ne peuvent généralement être assemblés que par soudage ou boulonnage, ce qui entraîne inévitablement des zones affectées thermiquement par les soudures, des concentrations de contraintes et des risques de fuite. En revanche, les alliages de tungstène, grâce aux procédés de formage quasi-fini et d'usinage de précision, permettent

#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

de fabriquer en une seule opération des réservoirs monoblocs, sans soudure, à parois épaisses et de forme irrégulière, éliminant ainsi tout risque de défaillance à l'interface.

En matière de résistance aux chocs et aux chutes, bien que les boîtes en acier présentent une certaine robustesse, elles sont sujettes à la déformation plastique, à la fissuration des soudures et au gauchissement de la surface d'étanchéité sous des charges à vitesse de déformation élevée. À l'inverse, la densité élevée et l'excellent compromis entre résistance et ténacité des alliages de tungstène leur confèrent une résistance à la déformation bien supérieure à celle de l'acier, à épaisseur de paroi égale. Même en cas de chute accidentelle, il n'en résultera qu'une petite marque localisée, sans dommage pénétrant ni altération de la forme.

En termes de stabilité à long terme, les réservoirs en acier sont sensibles à la fissuration différée induite par l'hydrogène, à la fissuration par corrosion sous contrainte et à la corrosion intergranulaire sous l'effet combiné de l'irradiation, des cycles thermiques et de la corrosion, la zone de soudure étant particulièrement vulnérable. Les alliages de tungstène, en revanche, n'absorbent pratiquement pas d'hydrogène, ne subissent pas de fragilisation par irradiation, ne présentent pas de phases de liaison faibles aux joints de grains et leurs dimensions et leur morphologie restent inchangées pendant des décennies. Les réservoirs blindés en alliage de tungstène ont franchi une étape fondamentale, passant d'une conception « structure + blindage » à une conception « blindage comme structure », tandis que les réservoirs blindés en acier restent au stade traditionnel d'une conception « structure porteuse + blindage externe ».

### **7.2.3 Comparaison de l'adaptabilité environnementale entre les conteneurs blindés en alliage de tungstène et les conteneurs blindés en acier**

L'adaptabilité environnementale des réservoirs blindés en acier est limitée par l'activité chimique inhérente et les défauts de microstructure des matériaux à base de fer, et leurs performances dans des environnements de service complexes deviennent de plus en plus inadéquates, tandis que les alliages de tungstène présentent une durabilité environnementale à large spectre inattendue.

Dans les environnements de décontamination hautement corrosifs (acide nitrique concentré, peroxyde d'hydrogène, hypochlorite de sodium, alcalis forts, vapeur à haute température), l'acier au carbone ordinaire se corrode rapidement et complètement. Bien que l'acier inoxydable puisse former un film de passivation, la corrosion par piqûres, la corrosion caverneuse et la fissuration par corrosion sous contrainte restent inévitables après des décontaminations répétées et prolongées, notamment au niveau des soudures et des zones affectées thermiquement. Les alliages de tungstène peuvent former un film de passivation d'oxyde extrêmement fin et dense à leur surface. Associés à des revêtements CrN, DLC ou fluorés facilement décontaminables, leur résistance à la corrosion surpasse largement celle des aciers inoxydables duplex et Hastelloy de la plus haute qualité, conservant un aspect miroir pendant des décennies, même dans les cycles de décontamination les plus exigeants en médecine nucléaire et en chambre chaude.

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



Dans des environnements à température et humidité élevées, exposés aux embruns salins, les boîtes en acier sont très sensibles à la rouille rouge, à la précipitation de sel et au cloquage du revêtement. En revanche, les alliages de tungstène associés à des revêtements en polyurée ou en fluorocarbène offrent une résistance aux intempéries quasi permanente. Sous forte irradiation, l'acier subit un gonflement important, une perte de ténacité et une accumulation de produits d'activation, tandis que les alliages de tungstène conservent une microstructure et des propriétés constantes, avec des niveaux extrêmement faibles de produits d'activation et une dégradation rapide.

En médecine nucléaire et en industrie pharmaceutique, où les exigences en matière de propreté et de biosécurité sont extrêmement élevées, il est difficile d'obtenir un poli miroir sur les conteneurs en acier, et le nettoyage complet des recoins microscopiques s'avère complexe. De plus, après une utilisation prolongée, les particules de rouille constituent une source secondaire de contamination. Les conteneurs en alliage de tungstène, quant à eux, permettent un polissage électrolytique miroir intégral et bénéficient de revêtements faciles à nettoyer de qualité médicale, éliminant ainsi toute accumulation de saletés et d'impuretés. Ils sont parfaitement compatibles avec la stérilisation à l'oxyde d'éthylène, au plasma de peroxyde d'hydrogène et à la vapeur haute température et haute pression.

Dans le processus de fin de vie et de recyclage, les réservoirs en acier sont souvent traités comme des déchets de faible activité en vrac en raison de la pollution et de la corrosion importantes, ce qui entraîne un volume important et des coûts d'élimination élevés ; les réservoirs en alliage de tungstène peuvent être directement fondus et recyclés en totalité, avec un taux de recyclage de près de 100 %, permettant ainsi de réaliser un cycle de recyclage fermé et zéro déchet.

En résumé, les conteneurs de blindage en acier ne conviennent qu'aux environnements difficiles présentant des conditions modérées, des exigences de décontamination faibles et une durée de vie limitée. À l'inverse, les conteneurs de blindage en alliage de tungstène sont utilisés dans tous les environnements extrêmes, des régions polaires aux grands fonds marins, des salles blanches aux enceintes thermodynamiques, et constituent la référence en matière d'adaptabilité environnementale pour les conteneurs de blindage contre les rayonnements. Le rôle des conteneurs en acier s'est progressivement réduit à celui d'un simple revêtement ou enveloppe extérieure pour les systèmes en alliage de tungstène, plutôt qu'à celui d'un blindage indépendant.

### **7.3 Comparaison entre les conteneurs de blindage en alliage de tungstène et les conteneurs en matériau composite**

Les conteneurs de blindage composites désignent principalement des systèmes tels que le plomb-polyéthylène, le bore-polyéthylène, le caoutchouc contenant du gadolinium/bore, les mélanges lourds de béton et de poudre de tungstène, les corps moulés par injection de résine de tungstène et les stratifiés de fibres polymères de tungstène, apparus ces dernières années. Ces matériaux étaient initialement censés offrir des avantages en termes de légèreté et de multifonctionnalité, mais dans des contextes réels de haute qualité, de longue durée de vie et de réglementation stricte, leurs problèmes d'interface inhérents, leurs mécanismes de vieillissement et la dégradation irréversible de leurs performances les rendent difficiles à substituer véritablement aux conteneurs de blindage en alliage de tungstène.

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

### 7.3.1 Comparaison de la composition des matériaux entre les boîtiers de blindage en alliage de tungstène et les boîtiers en matériau de blindage composite

Les conteneurs de blindage en alliage de tungstène sont des systèmes eutectiques quasi-binaires/ternaires de tungstène-nickel-fer ou de tungstène-nickel-cuivre sous une seule phase. Le frittage en phase liquide permet d'obtenir un matériau métallique homogène et dense, constitué d'une structure continue de particules de tungstène et d'une phase liante parfaitement imprégnée. Ce matériau ne présente aucune interface macroscopique, aucun composant polymère ni aucun composé organique volatil. En revanche, les conteneurs de matériaux de blindage composites sont essentiellement des systèmes artificiels multiphasiques et multi-échelles : des charges inorganiques à haute densité (particules de plomb, poudre de tungstène, carbure de bore, oxyde de gadolinium) sont dispersées à une concentration de 50 % à 85 % en volume dans une matrice de polyéthylène, de résine époxy, de caoutchouc silicone, de polyuréthane ou de fluoroplastique spécial. Les charges et la matrice sont liées par mélange physique ou par de faibles liaisons chimiques, l'interface constituant toujours le point faible du matériau.

tungst è ne sont contrôlables et présentent une homogénéité inter-lots extrêmement élevée, avec des taux d'impuretés totaux réduits à des niveaux pharmaceutiques. À l'inverse, les matériaux composites introduisent inévitablement des produits de dégradation de la matrice, une agglomération des charges, une migration des plastifiants et des promoteurs d'interface résiduels. Même avec les résines de qualité médicale les plus coûteuses et une poudre de tungstène ultrafine, la pureté et l'uniformité du système composite restent bien inférieures à celles des alliages de tungstène frittés, et elles se dégradent de manière irréversible avec le temps.

### 7.3.2 Comparaison des mécanismes de blindage entre les boîtiers de blindage en alliage de tungstène et les boîtiers de blindage en matériau composite

tungst è ne présentent une atténuation volumique continue, homogène et isotrope : les rayons gamma interagissent avec les particules de tungstène à numéro atomique élevé par génération continue de paires photoélectriques et Compton ; les neutrons, après modération par le tungstène, sont efficacement capturés par la phase liante ou les absorbeurs intégrés. L'ensemble du processus ne présente ni réflexion interfaciale, ni renforcement du rayonnement secondaire, ni zones de faible intensité directionnelle. En revanche, le mécanisme de blindage des conteneurs en matériaux composites repose sur une atténuation en cascade hétérogène, stratifiée et à phases séparées : les rayons gamma s'atténuent d'abord au sein des particules de charge à haute densité, puis pénètrent dans la matrice organique à faible densité, générant un grand nombre d'électrons secondaires et de rayons X caractéristiques ; les neutrons, après modération dans la matrice contenant de l'hydrogène, doivent traverser l'interface pour être absorbés par le bore ou le gadolinium, ce qui entraîne une diffusion interfaciale importante et une accumulation de dose localisée.

En raison des fluctuations statistiques inévitables liées à la taille, la distribution et l'orientation des particules de charge, les matériaux composites présentent un blindage non uniforme à l'échelle macroscopique, et il est impossible, par principe, d'éliminer les zones de faiblesse et les points chauds locaux. Les alliages de tungstène, quant à eux, atteignent une uniformité statistique à l'échelle micrométrique, réalisant ainsi un blindage sans zones mortes et une atténuation sans fluctuations. Sous

#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

l'effet de sources complexes à large spectre, le rayonnement secondaire et les effets d'interface des matériaux composites annulent souvent leurs avantages théoriques de légèreté, tandis que les alliages de tungstène conservent systématiquement le comportement de blindage volumique le plus simple et le plus prévisible.

### 7.3.3 Comparaison de la stabilité entre les conteneurs de blindage en alliage de tungstène et les conteneurs en matériau composite

Le principal point faible des matériaux de blindage composites réside dans le vieillissement et la dégradation interfaciale de leur matrice organique. L'irradiation entraîne la rupture des chaînes polymères, leur réticulation, leur jaunissement, leur fragilisation et la précipitation de petites molécules volatiles ; les hautes températures accélèrent l'oxydation et la dégradation thermique ; la chaleur humide induit la migration et l'hydrolyse des plastifiants ; les trempages répétés dans des détergents endommagent les liaisons interfaciales et provoquent le détachement des charges. Tous ces processus sont irréversibles, aboutissant à une réduction de la densité, une diminution de la teneur en hydrogène, la sédimentation des charges, la fissuration interfaciale et une baisse continue de l'efficacité du blindage. Les alliages de tungstène, quant à eux, sont composés exclusivement d'une phase métallique et ne présentent aucune voie de dégradation des polymères. L'irradiation ne provoque qu'une très faible prolifération de dislocations et de lacunes, sans modifier les propriétés macroscopiques ; la structure reste stable même à des températures bien inférieures à la température d'émergence de la phase liquide ; une forte oxydation et une décontamination ne forment qu'un film de passivation de quelques nanomètres en surface, sans affecter les performances globales. Après des décennies de service, la densité, la résistance et l'efficacité de blindage des réservoirs en alliage de tungstène restent exactement les mêmes qu'à leur sortie d'usine, tandis que les réservoirs en matériaux composites doivent souvent être complètement mis au rebut en 5 à 10 ans.

En termes de propreté et de biosécurité, les petites molécules organiques, les poussières de remplissage et les produits de dégradation libérés après le vieillissement du matériau composite deviennent une source continue de pollution dans les salles blanches et les environnements de médecine nucléaire ; après électropolissage miroir et revêtement de qualité médicale, la surface de l'alliage de tungstène peut maintenir en permanence un état sans précipitation et sans détachement de particules.

### 7.3.3 Comparaison des perspectives d'application entre les boîtes de protection en alliage de tungstène et les boîtes en matériau de protection composite

Le champ d'application des conteneurs de matériaux de blindage composites se réduit rapidement, ne subsistant que dans les scénarios transitoires et peu exigeants suivants :

- Blocs de remplissage pour transport à usage unique ou à court terme ;
- Une porte de protection temporaire contre les neutrons, avec un budget extrêmement limité ;
- Un boîtier de détecteur portatif extrêmement léger est nécessaire ;
- En tant que couche modératrice de neutrons auxiliaire ou couche protectrice externe pour les conteneurs en alliage de tungstène.

#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

Les conteneurs de blindage en alliage de tungstène ont longtemps dominé les applications haut de gamme, à longue durée de vie, soumises à des réglementations strictes et exigeant une propreté extrême, et continuent de s'implanter sur le marché moyen de gamme. Avec la baisse progressive des coûts de fabrication, la maturité des procédés de formage quasi-nets et le durcissement des réglementations internationales sur le plomb et les matériaux composites polymères, l'ère des conteneurs de blindage composites utilisés comme composants de blindage indépendants touche à sa fin. Au cours de la prochaine décennie, hormis quelques rares exigences particulières de légèreté, les matériaux composites seront entièrement relégués au rôle de charges auxiliaires dans les systèmes de blindage en alliage de tungstène, et ces derniers deviendront la solution de référence absolue, des chambres chaudes de médecine nucléaire à l'exploration spatiale lointaine, des salles blanches de semi-conducteurs aux installations de stockage de déchets radioactifs de haute activité.

tungstène et les matériaux de blindage composites représentent un véritable bond technologique en science des matériaux, passant d'une phase métallique massive et homogène à une structure artificielle hétérogène. L'expérience a démontré que dans tous les domaines de la radioprotection exigeant une fiabilité, une durée de vie et une prévisibilité maximales, un système à phase métallique unique, continue et stable finira par s'imposer. Les conteneurs en matériaux de blindage composites sont appelés à jouer un rôle transitoire, tandis que les conteneurs en alliage de tungstène constituent la forme ultime des conteneurs de blindage contre les rayonnements.



CTIA GROUP LTD Boîtier de blindage en alliage de tungstène

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT



## appendice:

### Annexe A : Norme chinoise relative aux boîtiers de protection en alliage de tungstène

Le système de normes chinois pour les conteneurs de blindage en alliage de tungstène repose principalement sur les normes nationales (série GB/T), complétées par des normes industrielles (séries HG/T, JB/T et YY/T). Il régit de manière exhaustive la composition des matériaux, les procédés de fabrication, les performances de blindage, les méthodes d'essai, le contrôle qualité et les exigences de conformité environnementale. Ces normes ont été élaborées conjointement par l'Administration d'État pour la réglementation du marché (SAMR) et le Comité technique de normalisation de l'industrie nucléaire, afin de garantir l'utilisation fiable des conteneurs de blindage en alliage de tungstène dans les chambres chaudes de médecine nucléaire, les installations de production d'isotopes, les équipements de contrôle industriel des défauts et les expériences d'irradiation scientifique.

La norme GB/T 3458-2016, « Alliages haute densité à base de tungstène », constitue une norme fondamentale spécifiant la composition chimique, l'uniformité de la densité, les propriétés mécaniques et les exigences de microstructure des alliages de tungstène utilisés dans les conteneurs de blindage. Elle met particulièrement l'accent sur la stabilité aux radiations et la résistance à la corrosion des systèmes tungstène-nickel-fer et tungstène-nickel-cuivre. La norme GB/T 4185-2017, « Poudre de tungstène pour alliages durs », étend cette norme aux poudres de tungstène spécifiquement destinées aux conteneurs de blindage. Elle porte sur le contrôle de la pureté et de la granulométrie lors du processus de réduction afin de garantir l'absence de porosité ou de ségrégation après frittage. Bien que la norme HG/T 2077-2017, « Conditions techniques pour les plombs de pêche en alliage de tungstène », soit conçue pour un usage civil, ses clauses relatives à la résistance à la corrosion et au traitement de surface ont été adoptées pour les spécifications des conteneurs de blindage industriels. La norme industrielle JB/T 12778-2017, « Conditions techniques des billes résistantes à l'usure en alliage haute densité », s'applique à la vérification de la résistance à l'usure des conteneurs de blindage, tandis que la norme YY/T 1636-2019, « Exigences techniques relatives aux collimateurs en alliage de tungstène à usage médical », spécifie la biocompatibilité et les performances d'atténuation des rayonnements des conteneurs de blindage à usage médical. En matière de protection de l'environnement, la norme GB/T 33357-2016, « Détermination de la migration des métaux lourds dans les produits en alliage de tungstène », garantit l'absence de risque de pollution pour les conteneurs blindés utilisés dans le stockage temporaire de produits médicaux et de déchets. Ces normes mettent l'accent sur la traçabilité complète et la certification par un organisme tiers. Les fabricants doivent réussir les audits de leur système de management de la qualité ISO 9001, et les réservoirs de protection doivent être accompagnés de rapports de lot et de courbes de performance à leur sortie d'usine. La rigueur et le caractère novateur du système de normes chinois confèrent aux réservoirs de protection en alliage de tungstène un avantage concurrentiel significatif sur le marché international.

### Annexe B Normes internationales pour les boîtiers de protection en alliage de tungstène

Les normes internationales relatives aux conteneurs de blindage en alliage de tungstène, principalement élaborées par ASTM International et l'ISO, fournissent des spécifications de matériaux, des méthodes d'essai et des lignes directrices d'application unifiées à l'échelle mondiale afin de garantir

#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

l'interopérabilité et la fiabilité des conteneurs de blindage en médecine nucléaire, en production d'isotopes, en détection de défauts industriels et en expériences de recherche scientifique.

La norme ASTM B777-20, « Spécification standard pour les alliages de tungstène haute densité », est une norme fondamentale qui détaille la composition, la densité, la résistance à la traction, la dureté et les performances à haute température des alliages de tungstène utilisés dans les conteneurs de protection. Elle s'applique aux enceintes thermiques et aux conteneurs de transport. La norme ASTM F3049-14, « Spécification pour les procédés de fabrication additive des alliages de tungstène », s'étend aux conteneurs de protection imprimés en 3D, en insistant sur la pureté des poudres et la densité de frittage. La norme ISO 9001:2015, « Systèmes de management de la qualité », sert de cadre général pour garantir la maîtrise de l'ensemble du processus de fabrication des conteneurs de protection. La norme ISO 13485:2016, « Systèmes de management de la qualité pour les dispositifs médicaux », s'applique aux conteneurs de protection médicaux, en soulignant les exigences de biocompatibilité et de propreté. La norme ISO 683-17, « Spécifications relatives aux paliers et composants d'outillage en alliage haute densité », s'appuie sur la vérification de la résistance à l'usure des conteneurs de protection. Ces normes sont élaborées par l'Organisation internationale de normalisation (ISO) et l'American Society for Testing and Materials (ASTM), qui privilégient la certification par un organisme tiers (comme UL et TÜV) et s'alignent sur les réglementations environnementales RoHS et REACH afin de garantir la conformité des conteneurs de protection dans la chaîne d'approvisionnement mondiale. Le caractère novateur des normes internationales a favorisé l'utilisation normalisée des cuves de protection en alliage de tungstène dans des procédés émergents tels que le rechargement laser et la projection à froid.

### **Annexe C : Normes relatives aux boîtes de protection en alliage de tungstène en Europe, en Amérique, au Japon, en Corée du Sud et dans d'autres pays**

Les réservoirs de protection en alliage de tungstène en Europe, aux États-Unis, au Japon et en Corée du Sud mettent l'accent sur la sécurité, la protection de l'environnement et une fiabilité élevée, et intègrent les réglementations régionales, formant un système diversifié basé sur le marquage CE de l'UE, les spécifications ASME américaines, les normes JIS japonaises et les normes KS sud-coréennes.

En Europe, le CEN/CENELEC fait office de référence. La norme EN 10025-6, « Spécifications relatives aux aciers de construction en alliage de tungstène », a été étendue aux matériaux des cuves blindées, en mettant l'accent sur la résistance aux hautes températures et à la corrosion. La norme EN ISO 15614-1, « Spécifications relatives aux procédés de soudage », couvre les exigences de brasage et d'assemblage des cuves blindées. La norme EN 13445, relevant de la Directive sur les équipements sous pression (DESP) 2014/68/UE, spécifie les essais de pression des cuves blindées dans les appareils à haute pression. Le marquage CE garantit la sécurité et la conformité des cuves blindées dans les enceintes chaudes et les équipements de transport.

Aux États-Unis, la norme ASME est la norme principale. La section IX de l'ASME BPVC, « Spécifications de soudage des alliages de tungstène », traite de l'intégrité des réservoirs blindés ; la norme ASME B31.3, « Spécifications de tuyauterie de procédé », aborde les exigences de résistance à la corrosion des réservoirs blindés lors du nettoyage chimique ; et la norme SAE AMS 7816, « Matériaux

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

aérospatiaux en alliage de tungstène », s'applique aux réservoirs blindés de qualité aérospatiale et met l'accent sur la stabilité à haute température.

La norme japonaise JIS Z 2241 « Méthodes d'essai des matériaux métalliques » a été étendue pour inclure la vérification de la dureté et de la fatigue des conteneurs blindés ; la norme JIS B 8363 « Spécification des systèmes pneumatiques » normalise la constance du débit des conteneurs blindés dans la détection des défauts industriels ; et les directives de la Société japonaise de soudage (JWES) mettent l'accent sur la précision des conteneurs blindés dans le traitement laser.

La norme coréenne KS D 3562, « Spécifications d'outillage pour l'industrie des alliages de tungstène », définit les exigences de résistance à l'usure des conteneurs blindés et est compatible avec les normes de sécurité gaz KGS afin de garantir leur fiabilité dans le traitement de l'énergie. L'Institut coréen d'essais et de certification (KPC) a certifié la conformité de ces conteneurs aux normes internationales telles que l'ISO.

Ces normes régionales sont largement reconnues mutuellement avec les normes mondiales, mettent l'accent sur la traçabilité et la protection de l'environnement, et promeuvent l'application normalisée des boîtes de protection en alliage de tungstène dans le commerce international.

#### Annexe D Glossaire des boîtiers blindés en alliage de tungstène

| Chinois                          | Explication  |
|----------------------------------|--|
| blindage en alliage de tungstène | Conteneurs spécialisés, principalement composés d'alliages à haute densité à base de tungstène, destinés à contenir et à atténuer les rayons gamma, les rayons X et les neutrons.  |
| Alliage tungstène-nickel-fer     | La teneur en tungstène est généralement de 90 à 97 %, et le nickel-fer est utilisé comme phase liante dans cet alliage à haute densité, qui présente une résistance élevée et un certain degré de ferromagnétisme.               |
| Alliage tungstène-nickel-cuivre  | La teneur en tungstène est généralement de 90 à 95 %, et le nickel-cuivre est un alliage haute densité avec une phase liante. Il est totalement amagnétique et présente une meilleure résistance à la corrosion.                 |
| Forme quasi-nette                | Un procédé de formage où les dimensions de l'ébauche sont proches de celles du produit final après pressage et frittage, avec une surépaisseur d'usinage minimale.   |
| frittage en phase liquide        | implique un frittage à une température supérieure au point de fusion de la phase liante, ce qui provoque la fusion et l'imprégnation des particules de tungstène par la phase liante, permettant ainsi une densification rapide. |
| Pressage isostatique à froid     | Technologie de formage qui applique une pression uniforme à 360° sur des préformes en poudre à l'aide d'un milieu liquide à température ambiante.  |
| Pressage isostatique à chaud     | Post-traitement pour éliminer les pores fermés résiduels et atteindre la densité théorique sous milieu de gaz inerte à haute température et haute pression .   |

#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

|  |  |
|--|--|
| Revêtement facile à nettoyer                               | Le revêtement fonctionnel, doté d'une énergie de surface extrêmement faible et d'un grand angle de contact, permet aux contaminants radioactifs d'adhérer uniquement par de faibles forces de van der Waals, ce qui facilite leur élimination par simple essuyage. |
| Sacrifiez la vessie interne                                | La doublure intérieure remplaçable est conçue pour éviter toute contamination directe du corps en alliage de tungstène ; elle peut être entièrement retirée une fois saturée.  |
| Ouvrez rapidement le couvercle                             | Un système de bouchon permettant une ouverture et une fermeture en quelques secondes grâce à un bouchon à vis, une pince ou un mécanisme hydraulique.  |
| Scellement du labyrinthe                                   | L'étanchéité sans contact est obtenue grâce à l'utilisation d'étapes et d'espaces à plusieurs niveaux pour former un canal d'écoulement d'air complexe.  |
| collimateur  | Structure d'ouverture directionnelle en alliage de tungstène ne laissant passer que les rayons dans une direction spécifique, utilisée pour la détection et le traitement des défauts.   |
| Répartition des angles de fuite                            | La distribution azimutale des fuites de rayonnement dans la direction non fonctionnelle du conteneur de blindage est utilisée pour évaluer l'intégrité du blindage.  |
| Alliage de tungstène à faible activation                   | Des qualités spéciales de nucléides à longue durée de vie et à très faibles niveaux d'irradiation sont produites en contrôlant strictement des éléments facilement activables tels que le Co, le Nb, le Ta et le Mo.   |
| étalonnage de la source réelle                             | L'efficacité réelle du blindage de la boîte finie a été mesurée à l'aide de sources standard de cobalt-60, de césium-137 ou d'iridium-192.   |
| détection des fuites par spectrométrie de masse à l'hélium | La méthode la plus sensible pour détecter les performances d'étanchéité globales d'un réservoir peut atteindre le niveau de $10^{-12}$ Pa · m <sup>3</sup> / s .   |
| test d'essuyage de la contamination de surface             | Après avoir essuyé la surface du récipient avec du papier filtre ou un coton-tige, le niveau de radioactivité est mesuré afin de déterminer si la contamination peut être transférée.  |
| Décontaminant  | Rapport entre la radioactivité de surface avant et après nettoyage ; une valeur plus élevée indique un nettoyage plus facile.  |
| épaisseur de paroi en gradient                             | en se basant sur la distribution spatiale du terme source, on minimise le poids du réservoir tout en assurant la conformité en tous points.  |
| alliage de tungstène de qualité médicale                   | Alliages de tungstène répondant aux exigences de biocompatibilité, de propriétés non magnétiques, de stérilisation et d'absence de précipitation en surface.   |
| Timbre de responsabilité à vie                             | Les marquages permanents apposés sur la boîte au moment de sa fabrication comprennent le fabricant, l'année, le numéro de lot et le numéro de série unique .   |
| Acte de naissance  | Le réservoir est livré avec les documents officiels comprenant l'ensemble des paramètres de la chaîne de fabrication, les rapports de test et une déclaration de responsabilité.   |

#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT



## Références

### Références chinoises

- [1] Wang Xiaoli, Li Xiaojie, Zhang Peng, et al. Développement et évaluation des performances d'un conteneur blindé en alliage de tungstène médical [J]. Équipement médical de Chine, 2023, 38(6) : 1-6.
- [2] Chen Li, Zhao Mingdong, Yang Fan, et al. Application d'un alliage de tungstène haute densité dans le blindage des cellules chaudes en médecine nucléaire [J]. Atomic Energy Science and Technology, 2024, 58(3): 512-519.
- [3] Comité technique national de normalisation du tungstène et des alliages durs. GB/T 3458-2016 Alliages à haute densité à base de tungstène [S]. Pékin : China Standards Press, 2016.
- [4] Administration nationale des produits médicaux. YY/T 1636-2019 Exigences techniques pour les collimateurs en alliage de tungstène médical [S]. Pékin : China Standards Press, 2019.
- [5] Liu Wei, Sun Hao, Zhang Jian, et al. Application technique de l'alliage tungstène-nickel-cuivre dans les conteneurs de blindage des déchets radioactifs de haute activité [J]. Nuclear Science and Engineering, 2023, 43(5): 987-994.
- [6] Zhao Zhiyuan, Liang Jing , Wang Qiang, et al. Progrès de la recherche sur la technologie de préparation des matériaux de blindage contre les radiations en alliage de tungstène [J]. Rare Metals Materials and Engineering, 2024, 53(2): 301-312.
- [7] Ministère de l'Industrie et des Technologies de l'Information. JB/T 14258-2022 Conditions techniques pour les composants de blindage en alliage de tungstène de qualité nucléaire [S]. Pékin : Machinery Industry Press, 2022.
- [8] Li Ming, Yang Bin, Cheng Liang , et al. Étude sur les performances d'un revêtement facile à nettoyer sur un réservoir de protection en alliage de tungstène [J]. Surface Technology, 2023, 52(8): 156-163.
- [9] Zhang Wei, Wu Hao, Xu Tao, et al. Application et développement des alliages de tungstène dans les réservoirs sources de détection de défauts radiographiques industriels [J]. Essais non destructifs, 2024, 46(4): 67-73.
- [10] Institut de normalisation de l'industrie nucléaire. EJ/T 1189-2021 Exigences techniques relatives aux matériaux de blindage en alliage de tungstène pour les conteneurs de transport de matières radioactives [S]. Pékin : Atomic Energy Press, 2021.

### Références en anglais

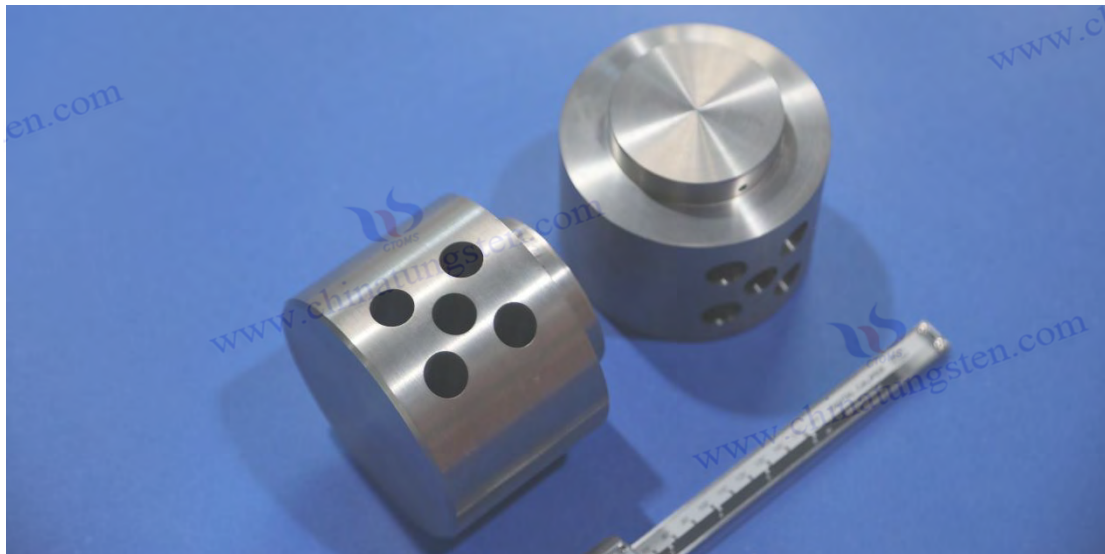
- [1] E. Lassner, WD Schubert. Tungstène : Propriétés, chimie, technologie de l'élément, alliages et composés chimiques[M]. New York : Kluwer Academic/Plenum Publishers, 1999.
- [2] RM German. Frittage des alliages lourds de tungstène[J]. International Journal of Refractory Metals and Hard Materials, 2022, 108: 105928.
- [3] ASTM B777-20. Spécification standard pour les alliages métalliques à base de tungstène à haute densité[S]. West Conshohocken, PA : ASTM International, 2020.
- [4] A. Hoffmann, M. Zimmermann. Alliages de tungstène pour applications de blindage contre les radiations en technologie médicale[J]. Advanced Engineering Materials, 2023, 25(15): 2300214.
- [5] AIEA. Règlement SSR-6 pour le transport sûr des matières radioactives, édition 2018[S]. Vienne : Agence internationale de l'énergie atomique, 2018.
- [6] J. Scannapieco, P. Carconi . Blindage à base de tungstène pour cellules chaudes et conteneurs de transport[J]. Nuclear Engineering and Design, 2021, 382: 111372.

#### 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)

- [7] Y. Chen, L. Zhang, et al. Performance de corrosion et de décontamination des alliages lourds de tungstène dans les environnements nucléaires[J]. Corrosion Science, 2024, 225: 111589.
- [8] ISO 13485:2016. Dispositifs médicaux — Systèmes de management de la qualité — Exigences à des fins réglementaires[S]. Genève : Organisation internationale de normalisation, 2016.
- [9] MA Meyers, KK Chawla. Comportement mécanique des alliages lourds de tungstène[J]. Science et ingénierie des matériaux : A, 2022, 845 : 143198.
- [10] Commission européenne. Directive 2011/65/UE (RoHS) et Règlement (CE) n° 1907/2006 (REACH) — Rapport de conformité des alliages de tungstène[R]. Bruxelles, 2023.



CTIA GROUP LTD Boîtier de blindage en alliage de tungstène

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

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