

Encyclopédie du poids des alliages de tungstène

中钨智造科技有限公司

CTIA GROUP LTD

CTIA GROUP LTD

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

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

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

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

PRÉSENTATION DU GROUPE CTIA

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

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

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

Forts de plus de 30 ans d'expérience dans le secteur, le Dr Hanns et son équipe 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

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

Table des matières

Préface

Contexte et importance de l'écriture
Contrepoids en alliage de tungstène
Comment ce livre est structuré
Public cible et utilisation

Chapitre 1 : Concepts de base et classification des contrepoids en alliage de tungstène

- 1.1 Définition et caractéristiques fonctionnelles des contrepoids en alliage de tungstène
- 1.2 Connaissances de base des alliages de tungstène à densité élevée (W-Ni-Fe / W-Ni-Cu, etc.)
- 1.3 Principaux types et formes de produits de contrepoids en alliage de tungstène
- 1.4 Comparaison avec les matériaux de contrepoids traditionnels (plomb, acier, cuivre, etc.)
- 1.5 Normes et systèmes de dénomination nationaux et internationaux des alliages de tungstène

Chapitre 2 : Propriétés physiques et chimiques des contrepoids en alliage de tungstène

- 2.1 Caractéristiques de densité et de contrôle qualité ($> 17 \text{ g/cm}^3$)
- 2.2 Propriétés mécaniques (résistance à la traction, dureté, résistance aux chocs)
- 2.3 Propriétés thermiques (conductivité thermique, coefficient de dilatation thermique)
- 2.4 Propriétés électriques et magnétiques
- 2.5 Analyse de la résistance à la corrosion et de l'adaptabilité environnementale
- 2.6 Caractéristiques de réponse dynamique et d'amortissement des vibrations à haute densité

Chapitre 3 : Technologie de préparation des contrepoids en alliage de tungstène

- 3.1 Principes de base de la métallurgie des poudres et flux de processus clés
- 3.2 Préparation des matières premières et contrôle du rapport (poudre de tungstène, phase liante)
- 3.3 Procédé de formage (moulage, pressage isostatique, moulage par injection, etc.)
- 3.4 Technologie de frittage (vide, phase liquide, contrôle de l'atmosphère)
- 3.5 Technologie d'usinage et de finition dimensionnelle
- 3.6 Nanotechnologie et méthodes de renforcement à haute densité

Chapitre 4 : Tests de performance et évaluation de la qualité

- 4.1 Dimensions géométriques et méthodes d'essai de densité
- 4.2 Normes d'essai des propriétés mécaniques (ASTM, ISO)
- 4.3 Détection de la structure métallographique et de la microstructure
- 4.4 Analyse de la composition chimique (ICP, XRF)
- 4.5 Contrôle de la qualité de surface et de la rugosité
- 4.6 Technologie d'essai non destructif (ultrasons, rayons X)

Chapitre 5 : Application à l'aérospatiale

- 5.1 Réglage du centre de gravité de l'avion et masses d'équilibrage des commandes de vol
- 5.2 Masses des satellites et systèmes de contrôle inertiel

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

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

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

- 5.3 Technologie des masses de queue des fusées et des missiles
- 5.4 Contrôle des vibrations de l'avion et blocs de masse de réaction
- 5.5 Masses d'inertie en alliage de tungstène dans les systèmes d'armes de défense

Chapitre 6 : Application aux automobiles et aux machines d'ingénierie

- 6.1 Répartition dynamique du poids du moteur et du châssis d'une automobile
- 6.2 Conception optimisée de la répartition du poids des voitures de course F1
- 6.3 Module de contrepoids pour trains à grande vitesse
- 6.4 Bloc de contrepoids pour grues, équipements de levage et machines de blindage
- 6.5 Solutions de poids stables pour les équipements de génie civil et de grande construction

Chapitre 7 : Application aux équipements électroniques et médicaux

- 7.1 Composants de contrepoids pour instruments de précision et gyroscopes
- 7.2 Blocs de tungstène (OIS) pour l'anti-tremblement dans les modules de caméra de téléphone portable
- 7.3 Conception de contrepoids stable pour les équipements de tomographie et d'IRM
- 7.4 Structures d'équilibrage mobiles pour les équipements de radiothérapie
- 7.5 Systèmes de contrepoids pour micro-drones et appareils portables

Chapitre 8 : Application dans les domaines sportif et civil

- 8.1 Conception du poids des clubs de golf et des boules de bowling
- 8.2 Poids de l'équipement de tir
- 8.3 Poids du matériel de pêche et systèmes d'équilibrage des modèles réduits d'avions
- 8.4 Poids de l'appareil photo, du stabilisateur et du trépied
- 8.5 Fonctions de poids des outils civils et des produits personnalisés haut de gamme

Chapitre 9 : Protection de l'environnement, sécurité et réglementation

- 9.1 Propriétés écologiques et avantages non toxiques des poids en alliage de tungstène
- 9.2 Analyse de la substitution des matériaux en plomb
- 9.3 Compatibilité avec REACH, RoHS et autres réglementations environnementales internationales
- 9.4 Exigences du système qualité pour les industries aérospatiales et militaires
- 9.5 Mécanismes de traçabilité et de contrôle des lots

Chapitre 10 : Développement du marché et tendances de l'industrie

- 10.1 Ressources mondiales en tungstène et chaîne d'approvisionnement en matériaux pour contrepoids
- 10.2 Taille du marché et tendances de la demande
- 10.3 Entreprises typiques et paysage concurrentiel international
- 10.4 Tendances de mise à niveau des produits tirées par les nouvelles technologies
- 10.5 Position stratégique dans les futurs équipements haut de gamme

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

Annexes

Annexe I : Spécifications et paramètres de performance des contrepoids courants en alliage de tungstène

Annexe II : Tableau comparatif des normes internationales et chinoises sur les alliages de tungstène

Annexe III : Équipements et paramètres de processus couramment utilisés

Annexe IV : Glossaire et explication des abréviations

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

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

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

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/cm³), 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

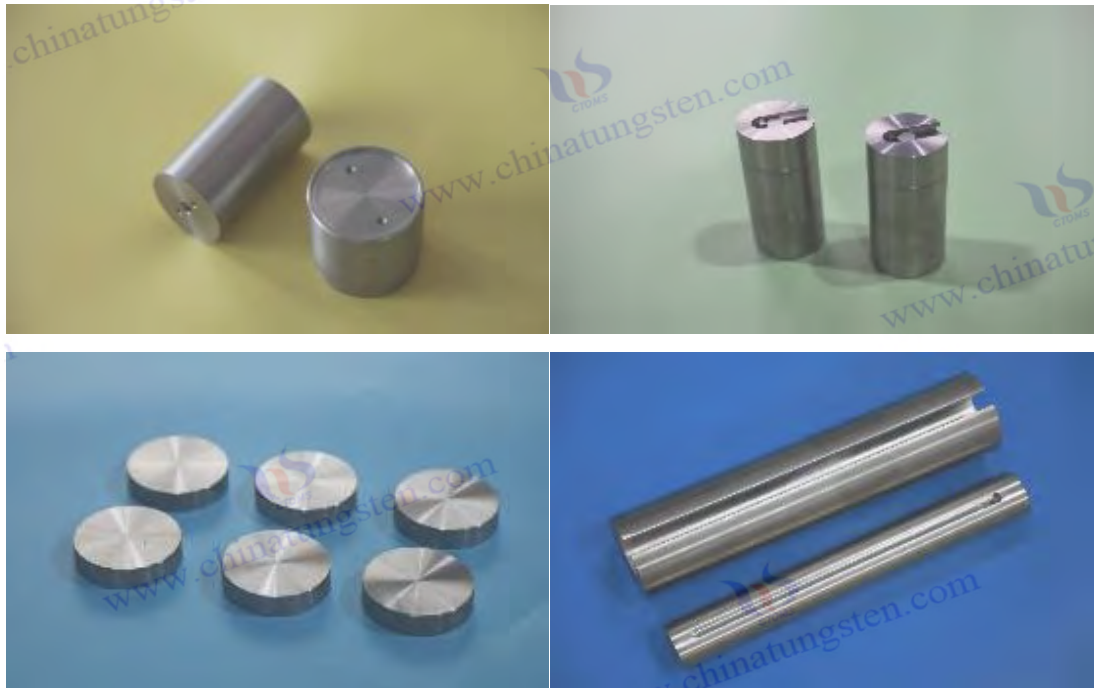
1 billion+ visits to the official website, 1 million+ web pages, 100,000+ customers, 0 complaints in 30 years!

Contact us

Email: sales@chinatungsten.com

Tel: +86 592 5129696

Official website: 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

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



Préface

Contexte et importance de l'écriture

Avec le développement rapide des industries haut de gamme telles que l'aérospatiale, la fabrication de précision, les équipements intelligents, l'imagerie médicale et les véhicules à énergies nouvelles, les systèmes de contrepoids, en tant que composant essentiel pour l'équilibre mécanique, l'amélioration de la stabilité et la précision du contrôle fonctionnel, font l'objet de plus en plus d'exigences techniques et structurelles. Bien que les matériaux de contrepoids traditionnels tels que le plomb, l'acier et le cuivre présentent certains avantages en termes de densité et de faisabilité de traitement, ils ne répondent plus aux exigences globales des équipements de nouvelle génération, qui exigent « haute densité, faible encombrement et grande stabilité » en termes de performances, de respect de l'environnement et de compacité.

L'alliage de tungstène, en particulier les matériaux composites à base de tungstène haute densité représentés par les systèmes W-Ni-Fe et W-Ni-Cu, est devenu un matériau idéal pour les systèmes de contrepoids modernes hautes performances grâce à sa **densité ultra-élevée ($> 17 \text{ g/cm}^3$)**, **ses excellentes propriétés mécaniques**, **son adaptabilité environnementale exceptionnelle** et **ses caractéristiques non toxiques et respectueuses de l'environnement**. Dans l'aérospatiale, il est utilisé pour le réglage du centre de gravité et le contrôle d'attitude des avions ; dans l'industrie automobile, il sert à l'équilibrage et au réglage dynamique du châssis ; dans les équipements médicaux, il assure la stabilité de l'image et la précision mécanique ; dans le domaine civil, il remplace progressivement les métaux lourds traditionnels et s'intègre aux équipements haut de gamme et aux équipements sportifs de précision.

Les contrepoids en alliage de tungstène représentent non seulement le progrès des technologies de matériaux de pointe, mais aussi l'innovation globale des procédés de fabrication, des concepts de conception, des systèmes standards et même des modèles de chaîne d'approvisionnement. À l'heure actuelle, la littérature systématique sur les contrepoids en alliage de tungstène est encore

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

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

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

relativement dispersée, manquant d'un ouvrage de référence panoramique couvrant les fondements des matériaux, les procédés de préparation, les tests de performance, les applications typiques et le développement industriel. C'est pourquoi nous avons compilé cet ouvrage, « Encyclopédie des contrepoids en alliage de tungstène », afin de combler cette lacune, de classer et d'analyser en profondeur la technologie de base et la valeur industrielle des contrepoids en alliage de tungstène, et de servir tous les utilisateurs, de la recherche scientifique à la conception, en passant par la fabrication et l'application.

Contrepoids en alliage de tungstène

Le tungstène joue un rôle de plus en plus important dans la sécurité énergétique, les équipements militaires et les futurs systèmes de transport. En particulier, les alliages de tungstène utilisés dans la fabrication de contrepoids offrent non seulement une grande cohérence entre l'efficacité d'utilisation des matériaux et les capacités d'intégration fonctionnelle, mais jouent également un rôle clé dans **la réduction du poids et l'amélioration de l'efficacité, la fabrication verte et l'optimisation des systèmes.**

- Dans le **domaine aérospatial**, les masses en alliage de tungstène sont largement utilisées dans les structures centrales telles que les gouvernes de vol, les blocs de réglage d'attitude, les systèmes de navigation inertielle et les blocs de masses de réaction. Leur haute densité permet de réduire considérablement le volume de la structure et d'optimiser l'utilisation de l'espace et la précision du contrôle.
- Dans les **véhicules à énergie nouvelle et les équipements intelligents**, l'alliage de tungstène est utilisé comme contrepoids dynamique dans les systèmes d'entraînement électrique et les mécanismes de contrôle automatique pour améliorer la vitesse de réponse et les capacités de contrôle de l'équilibre, et aider à réduire le bruit et les vibrations dans le système.
- Dans les **systèmes d'énergie nucléaire et de physique des hautes énergies**, les contrepoids en alliage de tungstène ont des fonctions de protection contre les radiations et démontrent une sécurité élevée et une stabilité de service à long terme dans des environnements d'exploitation complexes.
- Parallèlement, ses caractéristiques respectueuses de l'environnement, à savoir **être non toxique, inoffensif et facile à recycler**, en font également un choix clé pour le remplacement progressif des matériaux de contrepoids à base de plomb, répondant aux exigences des réglementations environnementales internationales telles que REACH et RoHS.

Comment ce livre est structuré

Ce livre est divisé en **dix chapitres et cinq annexes**, couvrant la théorie fondamentale, les propriétés des matériaux, le procédé de fabrication, les méthodes d'essai, les cas d'application, les normes industrielles et les tendances futures des contrepoids en alliage de tungstène. Les dispositions spécifiques sont les suivantes :

- **Le chapitre 1** présente les concepts de base, les méthodes de classification et le système standard de poids des alliages de tungstène ;

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

- **Le chapitre 2** analyse systématiquement ses propriétés physiques, mécaniques, thermiques, environnementales et dynamiques ;
- **Le chapitre 3** détaille le processus de préparation, de traitement et de renforcement de la métallurgie des poudres ;
- **Le chapitre 4** trie les méthodes de test courantes et les techniques de contrôle qualité ;
- **Les chapitres 5 à 8** interprètent les applications typiques dans quatre domaines principaux : l'aérospatiale, l'automobile, le médical et le civil ;
- **Le chapitre 9** se concentre sur sa position en matière de protection de l'environnement, de réglementation et de conformité internationale ;
- **Le chapitre 10** se concentre sur l'état du marché, la structure de l'entreprise et l'orientation future du développement ;
- **L'annexe** fournit les paramètres de spécification couramment utilisés, la compilation standard et l'index des cas pour une référence facile et une pratique d'ingénierie.

Public cible et utilisation

Ce livre est destiné aux lecteurs suivants :

- **Chercheurs et ingénieurs des matériaux** : peuvent servir de support théorique à la recherche sur les matériaux en alliage de tungstène à haute densité, l'optimisation des performances et la conception structurelle ;
- **Personnel de conception industrielle et de fabrication** : peut fournir une base technique pour le développement de nouveaux produits, l'évaluation des performances et l'adaptation structurelle ;
- **Ingénieurs en approvisionnement d'équipements et en applications de produits** : peuvent servir de référence importante pour la sélection des matériaux de contrepoids et la formulation des chemins de processus ;
- **Décideurs politiques et analystes de l'industrie** : peuvent être utilisés pour comprendre l'état et la tendance de développement des matériaux en tungstène dans la fabrication de pointe ;
- **Enseignants et étudiants des collèges et universités et stagiaires de formation technique** : peuvent être utilisés comme supports pédagogiques et références de cas pour l'enseignement et les cours professionnels.

Le contenu de cet ouvrage est axé **sur l'applicabilité technique et la mise en pratique**, en prenant en compte à la fois la profondeur théorique et les détails techniques. Il est également fourni avec des graphiques types, des comparaisons de données et des analyses de cas réels, visant à fournir une référence professionnelle à la fois systématique, complète et facile à mettre en œuvre.

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

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

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



Chapitre 1 Concepts de base et classifications des contrepoids en alliage de tungstène

1.1 Définition et caractéristiques fonctionnelles des poids en alliage de tungstène

Les contrepoids en alliage de tungstène sont généralement des alliages haute densité composés de tungstène (W) comme élément matriciel et d'une certaine proportion de métaux de liaison (tels que le nickel Ni, le fer Fe, le cuivre Cu, etc.). Ils sont transformés en composants fonctionnels aux dimensions géométriques et à la masse spécifiques par formage, frittage et finition. Ils sont principalement utilisés pour la réalisation de contrepoids structurels, l'équilibrage des masses, le contrôle de l'inertie et l'absorption des vibrations.

L'alliage de tungstène est largement utilisé pour remplacer les contrepoids traditionnels dans la fabrication d'équipements modernes haut de gamme et **l'ingénierie de précision**, en raison de ses excellentes **propriétés physiques** (densité élevée et faible encombrement), **mécaniques** (résistance élevée et bonne dureté), **adaptabilité environnementale** (résistance à la corrosion et aux hautes températures) et performances environnementales (non radioactif, non toxique et inoffensif). Il est devenu une solution de contrepoids essentielle dans **l'aérospatiale, l'industrie automobile, les équipements médicaux, les systèmes militaires et les produits civils haut de gamme**.

Les principales caractéristiques comprennent :

- **Haute densité et faible volume** : l'alliage de tungstène présente une densité de **17,0 à 18,5 g/cm³**, soit 1,6 fois celle du plomb et 2 fois celle de l'acier. Il permet d'obtenir un

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

meilleur effet de contrepoids dans un espace restreint et est particulièrement adapté aux systèmes à espace restreint et à masse contrôlée.

- **Usinabilité et contrôlabilité structurelle** : Des structures complexes peuvent être réalisées par usinage, étincelle électrique, impression 3D, etc. pour répondre aux besoins de contrepoids de forme spéciale.
- **Bonnes propriétés mécaniques** : résistance à la traction jusqu'à **700-1200 MPa** , dureté supérieure à **300 HV** , bonne ténacité aux chocs et résistance à la fatigue.
- **Stabilité à haute température et inertie chimique** : Il peut servir longtemps dans un environnement thermique de **400 à 800 °C** et est stable dans la plupart des environnements acides et alcalins.
- **Blindage électromagnétique et faible interférence magnétique** : adapté aux structures de précision telles que les contrepoids d'instruments électroniques et les systèmes d'équilibrage de gyroscopes.
- **Vert, respectueux de l'environnement et recyclable** : ne contient pas de plomb ni de métaux lourds nocifs, et est conforme aux directives internationales de protection de l'environnement telles que RoHS et REACH.

1.2 Connaissances de base des alliages de tungstène lourds (W-Ni-Fe / W-Ni-Cu, etc.)

Les contrepoids en alliage de tungstène utilisent principalement deux types d'alliages à base de tungstène à densité élevée : le **W-Ni-Fe (tungstène-nickel-fer)** et le **W-Ni-Cu (tungstène-nickel-cuivre)** . Ils présentent des performances mécaniques, électromagnétiques et anticorrosion différentes et conviennent à différents scénarios d'application.

Alliage de tungstène W-Ni-Fe

- **Caractéristiques de composition** : Le rapport typique est W (90–97 % en poids) + Ni (3–5 % en poids) + Fe (1–3 % en poids)
- **Avantages en termes de performances** :
 - o Haute résistance, la résistance à la traction peut atteindre **1 000 à 1 200 MPa**
 - o Haute limite d'élasticité, adapté aux structures porteuses ou résistantes aux chocs
 - o Bonne résistance à l'usure, convient aux pièces structurelles militaires et aéronautiques
- **Applications typiques** : volants d'inertie, contrepoids de gouverne de queue de missile, systèmes de contrôle de vol, modules de stabilisation gyroscopique, etc.

Alliage de tungstène W-Ni-Cu

- **Caractéristiques de composition** : W (90–97 % en poids) + Ni (3–5 % en poids) + Cu (2–4 % en poids)
- **Avantages en termes de performances** :
 - o Meilleure conductivité, adapté au contact électrique avec les contrepoids
 - o Faible interférence magnétique, adapté aux systèmes électroniques de précision

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

- Forte résistance à la corrosion, convient aux environnements à forte humidité ou marins
- **Utilisations typiques** : contrepoids de médecine nucléaire, appareils de tomographie, équipements de protection EMI, dispositifs d'équilibrage civils, etc.

Des systèmes d'alliages de tungstène tels que W-Ni-Co, W-Cu-Re et W-Polymer ont été développés ces dernières années pour étendre leurs fonctions de contrepoids dans l'impression 3D, les matériaux auto-cicatrisants et les conditions de travail extrêmes.

1.3 Principaux types et formes de produits de poids en alliage de tungstène

Les contrepoids en alliage de tungstène peuvent être divisés dans les catégories suivantes en fonction des différentes exigences d'application et des caractéristiques structurelles :

Classification par finalité :

- **Contrepoids structurel** : utilisé pour le réglage du centre de gravité des équipements et le contrôle de l'inertie, tels que les contrepoids d'ailerons d'avions et les contrepoids de châssis de course F1
- **Poids protecteur** : Il a à la fois des fonctions de blindage et d'équilibrage du poids, comme le poids du corps de l'équipement de radiothérapie
- **Contrepoids dynamique** : Nécessité de s'ajuster ou de réagir au mouvement, comme les cardans gyroscopiques et les composants de contrepoids du stabilisateur de caméra
- **Contrepoids spatial** : utilisé pour les structures de haute précision avec des contraintes d'espace strictes, telles que les sondes médicales et les unités gyroscopiques
- **Contrepoids réglable** : utilisé en conjonction avec des vis, des glissières et d'autres structures pour ajuster le poids et la position, comme l'équipement de tir

Classification par forme :

- **Bloc** : cuboïde standard, cube, cylindre, facile à empiler et à combiner
- **Anneau** : couramment utilisé dans les systèmes d'équilibrage rotatifs, tels que les gyroscopes et les rotors de générateur
- **Tige/broche** : Utilisée pour la pondération locale ou le réglage fin de l'équilibre, facile à insérer
- **Type d'insert** : intégré dans des structures en plastique ou composites, comme le contrepoids d'un module de caméra OIS
- **Pièces de forme spéciale** : CNC personnalisées selon la structure réelle, comme la queue de contrôle du missile, la structure de la cabine du contrepoids de contrôle de vol

Classification par forme de traitement :

- **Type de pressage pour métallurgie des poudres**
- **Type de finition CNC**
- **Type d'usinage par décharge électrique (EDM)**
- **fabrification additive par impression 3D**

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

1.4 Comparaison entre les contrepoids en alliage de tungstène et les matériaux de contrepoids traditionnels (plomb, acier, cuivre, etc.)

Matériel	Densité (g/cm ³)	force	Protection de l'environnement	Contrôle dimensionnel	Interférences électromagnétiques
Alliage de tungstène	17,0–18,5	Élevé (700–1200 MPa)	☑ Non toxique	Excellent (±0,01 mm)	Très faible (pour les équipements électroniques)
plomb	11.3	Faible (<100 MPa)	✗ Toxique	en général	Haut, facile à interférer
acier	7.8	Moyen à élevé	☑	bien	milieu
cuivre	8,9	milieu	☑	bien	Modéré
aluminium	2.7	Moyen-faible	☑	excellent	Très faible

Comme le montre le tableau, l'alliage de tungstène est supérieur aux contrepoids traditionnels en termes de **densité, de contrôle des dimensions, de sécurité, de protection de l'environnement et de résistance aux interférences**. Il est particulièrement adapté aux applications nécessitant **un faible volume et une masse importante**, et constitue une alternative intéressante aux contrepoids modernes haut de gamme.

1.5 Normes et systèmes de dénomination des alliages de tungstène nationaux et internationaux

Les poids en alliage de tungstène ont formé un système standard relativement mature, qui comprend principalement des normes nationales (GB), des normes industrielles (HB, YS), des normes internationales (ASTM, MIL, ISO), etc.

Système standard chinois :

- **GB/T 24187-2009** Alliage de tungstène lourd
- Poudre d'alliage de tungstène lourd **YS/T 798-2012**
- **HB/Z 99-2018** Spécifications techniques pour les alliages de tungstène lourds destinés à l'aviation
- **JB/T 10647-2006** Spécifications techniques générales pour contrepoids en alliage de tungstène

Système international de normes :

- **ASTM B777-15** : Spécification standard pour les alliages lourds de tungstène
- **MIL-T-21014D** : Spécification militaire – Alliages haute densité à base de tungstène
- **ISO 22068:2010** : Tungstène et alliages de tungstène — Vocabulaire et classification

Exemple de dénomination :

- **WNiFe90** : Indique que la teneur en tungstène est de 90 %, et le reste est constitué de phase de liaison Ni et Fe (généralement Ni:Fe = 7:3)

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

- **W-Ni-Cu 93/4/3** : désigne un alliage ternaire à haute densité composé de 93 % de tungstène, 4 % de nickel et 3 % de cuivre
- **WHAS Grade 1–4** (classification ASTM) : de faible résistance (grade 1) à haute résistance (grade 4)

De plus, différentes entreprises et différents pays ont également leurs propres marques spécifiques, telles que :

- Série TWM (matériau de poids en tungstène) de **Chine Tungstène**
- Série Densimet ® de **Plansee**
- Série d'alliages lourds en tungstène de **HC Starck**

Dans les applications d'ingénierie réelles, la sélection doit être basée sur **l'environnement d'utilisation, les exigences mécaniques et les compromis de coûts**, combinés aux exigences standard et aux paramètres de l'entreprise pour obtenir la correspondance optimale des matériaux.

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/cm³), 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

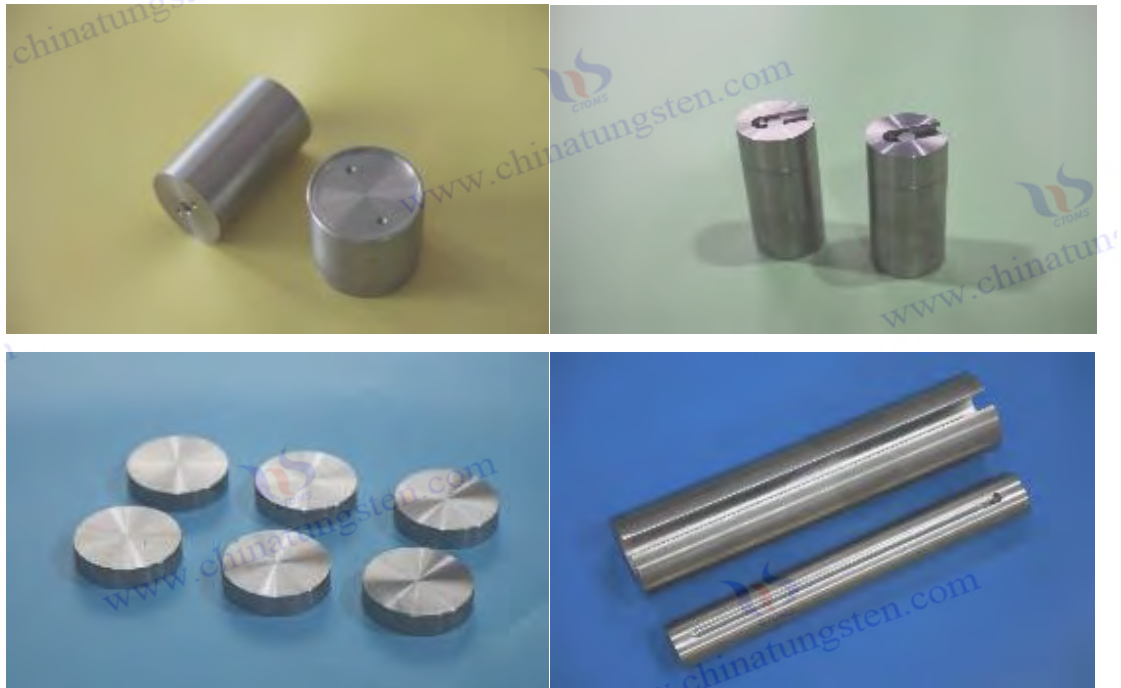
1 billion+ visits to the official website, 1 million+ web pages, 100,000+ customers, 0 complaints in 30 years!

Contact us

Email: sales@chinatungsten.com

Tel: +86 592 5129696

Official website: 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

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



Chapitre 2 Propriétés physiques et chimiques des contrepoids en alliage de tungstène

Les propriétés physiques et chimiques uniques de l'alliage de tungstène constituent son atout majeur dans diverses applications de contrepoids. Ce chapitre analyse en détail les performances des contrepoids en alliage de tungstène sous six aspects : contrôle de la densité, propriétés mécaniques, conductivité thermique, propriétés électromagnétiques, adaptabilité environnementale et réponse dynamique, fournissant ainsi une base scientifique pour le choix de la conception, l'application technique et l'intégration système.

2.1 Caractéristiques de densité et de contrôle de qualité ($>17 \text{ g/cm}^3$)

La caractéristique la plus remarquable des alliages de tungstène est leur densité extrêmement élevée. La densité des alliages de tungstène W-Ni-Fe ou W-Ni-Cu couramment utilisés varie de $17,0$ à $18,5 \text{ g/cm}^3$, ce qui est proche de celle du tungstène pur ($19,3 \text{ g/cm}^3$) et bien supérieure à celle de l'acier ($7,8 \text{ g/cm}^3$), du cuivre ($8,9 \text{ g/cm}^3$) ou du plomb ($11,3 \text{ g/cm}^3$).

Avantage de densité :

- **Un petit volume permet d'obtenir une grande masse** : il est propice à l'obtention d'un équilibre de poids précis dans des scénarios avec un espace structural limité, tels que les ailerons d'avion, les gouvernails de contrôle de missiles, les gyroscopes de précision, etc.
- **Amélioration de l'inertie** : L'énergie cinétique élevée et l'inertie apportées par la haute densité contribuent à la stabilité anti-perturbation du système de mouvement et sont

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

particulièrement adaptées aux occasions de stabilité passive qui nécessitent une « confrontation de masse » (comme l'absorption des chocs et le contrôle du recul).

- **Remplacement de qualité égale** : Sous les mêmes exigences de qualité, le volume occupé par l'alliage de tungstène n'est que de 60 % de plomb et de 40 % d'acier, ce qui est propice à la compression structurelle et à la conception intégrée.

Méthode de contrôle de la densité :

- Lors de l'étape de pressage par métallurgie des poudres, la densité de la préforme est contrôlée avec précision par **la pression de moulage (500–1000 MPa) et la technologie de pressage isostatique à chaud (HIP)** ;
- Au cours du processus de frittage, **le frittage en phase liquide** (plage de température : 1400–1500°C) est utilisé pour supprimer la formation de pores et obtenir un contrôle de la microporosité de $^{**}<0,5\%^{**}$;
- Le test de densité du produit fini est réalisé selon **la méthode d'Archimède (ASTM B962)** et sa précision peut être contrôlée à $\pm 0,01 \text{ g/cm}^3$. Certaines applications haut de gamme nécessitent une erreur de mesure inférieure à 0,5 %.

Les données de 2025 montrent que la densité des blocs de contrepoids en alliage de tungstène haute densité développés indépendamment par China Tungsten Intelligence a atteint une plage de contrôle de lot industriel de **17,8 à 18,2 g/cm³** , répondant pleinement aux besoins des domaines de l'aérospatiale et de la physique des hautes énergies.

2.2 Propriétés mécaniques (résistance à la traction, dureté, ténacité aux chocs)

L'alliage de tungstène a non seulement une densité élevée, mais possède également d'excellentes propriétés mécaniques et peut fonctionner de manière stable dans des situations de charge, de résistance aux chocs et de résistance à la déformation.

résistance à la traction:

- Résistance à la traction typique du système W-Ni-Fe : **900–1200 MPa** ;
- Le système W-Ni-Cu est légèrement inférieur, environ **700–950 MPa** ;
- Après renforcement par nanoparticules ou optimisation par frittage en phase liquide, la résistance à la traction de certains alliages de tungstène à haute résistance peut atteindre **> 1400 MPa** ;
- **La limite d'élasticité est** généralement supérieure à **800 MPa** , ce qui convient au travail sous pression ou dans un environnement vibratoire.

dureté:

- Plage de dureté Vickers (HV10) **300–450 HV** ;
- Après un traitement de durcissement de surface (tel qu'un revêtement TiN), il peut atteindre **>500 HV** ;

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

- Il est plusieurs fois plus dur que le plomb (~50 HV) et l'acier (~200 HV), ce qui le rend plus adapté aux environnements d'assemblage qui nécessitent une résistance à l'usure et à la pression à long terme.

Résistance aux chocs :

- Énergie d'impact (type Charpy V) environ **10–30 J/cm²** ;
- Le test d'impact Izod (ASTM E23) montre que sa résistance aux chocs est adaptée aux systèmes de poids dynamiques, tels que la cabine de queue de fusée, la structure antichoc d'automobile, etc.

Les propriétés mécaniques sont considérablement affectées par des facteurs tels que la densité de frittage, le rapport de phase liante, la taille des grains, etc. Des recherches menées en 2024 ont montré que lorsque la température de frittage est contrôlée à **1450°C** et que le rapport de phase liante est Ni:Fe = 7:3, les propriétés mécaniques du matériau sont optimales.

2.3 Propriétés thermiques (conductivité thermique, coefficient de dilatation thermique)

L'alliage de tungstène présente une bonne stabilité thermique dans un environnement à haute température ou à cycle thermique et convient aux systèmes de contrepoids avec des charges thermiques concentrées telles que la périphérie des moteurs d'avion et les systèmes d'énergie nucléaire.

Conductivité thermique :

- W-Ni-Fe : **70–90 W/m·K**
- W-Ni-Cu : meilleure conductivité thermique, jusqu'à **100–130 W/m·K**
- La conductivité thermique élevée facilite la conduction rapide de l'énergie thermique et réduit l'accumulation de contraintes locales

Coefficient de dilatation thermique :

- Coefficient de dilatation thermique (CTE) : **4,5–6,5 × 10⁻⁶ /K**
- Bonne compatibilité avec les matériaux de structure tels que le titane et l'acier pour éviter les décalages structurels causés par la dilatation et la contraction thermiques ;
- La taille change peu dans des conditions de température élevée, garantissant ainsi la stabilité de la précision.

Le test du cycle thermique 2023 (-50°C ↔ 500°C) a montré que l'erreur dimensionnelle de la structure du contrepoids en alliage de tungstène était toujours contrôlée dans la plage de **±0,02 mm** après 1000 cycles.

2.4 Propriétés électriques et magnétiques

L'alliage de tungstène a une conductivité modérée et des propriétés magnétiques contrôlables, et les matériaux peuvent être adaptés en fonction de différentes exigences de conception.

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

Propriétés électriques :

- Résistivité : **3,5–6,0 $\mu\Omega\cdot\text{cm}$** ;
- Le W-Ni-Cu a une meilleure conductivité que le système W-Ni-Fe ;
- Dans les conceptions nécessitant une protection antistatique, contre la foudre ou une compatibilité CEM, l'alliage de tungstène peut servir à la fois de contrepoids et de fonctionnalité.

Propriétés magnétiques :

- Le système W-Ni-Fe présente une certaine perméabilité magnétique et convient aux composants qui doivent être associés à des éléments magnétiquement sensibles ;
- Le W-Ni-Cu est **un matériau faiblement magnétique** (presque non magnétique), adapté aux gyroscopes de précision, aux composants magnétiques sensibles, aux équipements IRM, etc.
- La réponse magnétique peut être contrôlée en sélectionnant et en ajustant le rapport de la phase liante.

Des tests réalisés en 2024 ont montré que la perméabilité magnétique de l'alliage de tungstène à faible magnétisme peut être contrôlée à **<1,02** , répondant ainsi aux exigences strictes des équipements médicaux de précision pour une « interférence magnétique zéro ».

2.5 Analyse de la résistance à la corrosion et de l'adaptabilité environnementale

L'alliage de tungstène présente une excellente résistance à la corrosion et aux intempéries dans une variété d'environnements extrêmes en raison de sa structure dense et de la stabilité chimique de l'élément tungstène lui-même.

Résistance à la corrosion :

- Stable à l'atmosphère, à la vapeur d'eau et à l'environnement huileux ;
- du brouillard salin et des milieux acides (tels que HCl, H₂SO₄) est bien inférieure à celle de l'acier et du cuivre ;
- Après le test au brouillard salin neutre (5% NaCl, 500 h) en 2023, l'épaisseur de la couche d'oxyde superficielle est seulement **<5 μm** , sans perte de qualité significative ;
- en ajoutant un traitement de revêtement (tel que CrN, NiP), il peut être utilisé dans un environnement marin ou de brouillard acide, et la durée de vie est augmentée de **> 5 ans** .

Adaptabilité environnementale :

- Peut fonctionner de manière stable pendant une longue période dans la plage de **-60°C à +500°C** ;
- Bonne résistance aux rayons ultraviolets, aux radiations, à l'humidité élevée, aux chocs thermiques et à d'autres environnements ;

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

- En 2025, un certain contrepoids en tungstène pour l'aviation sera soumis à un test de conditions de travail combiné **de vibrations de 20 g/1 000 fois les chocs thermiques**, avec un taux de rétention de l'intégrité structurelle > 95 %.

2.6 Caractéristiques de réponse dynamique et d'amortissement des vibrations à haute densité

L'alliage de tungstène présente également d'excellentes capacités de réponse inertielle dynamique et de contrôle des vibrations, et constitue un « élément de réglage inerte » couramment utilisé dans les systèmes de mouvement hautes performances.

Réponse dynamique :

- La haute densité confère une énergie cinétique élevée, améliorant la capacité anti-interférence dans la régulation inertielle (comme les systèmes de navigation inertielle aérospatiaux) ;
- Utilisé pour équilibrer les pièces rotatives d'un aéronef ou d'un équipement afin d'optimiser la trajectoire du mouvement et de réduire les vibrations ;
- Après avoir été appliqué au poids du châssis des voitures de course F1, la stabilité de la carrosserie est améliorée de > **15 %** (amélioration mesurée de l'accélération latérale).

Amortissement des vibrations :

- La structure interne est dense, avec peu de micropores et une résistance acoustique élevée, ce qui peut absorber l'énergie des vibrations ;
- En 2024, des tests sur des stabilisateurs de caméra et des télescopes de haute puissance ont montré que les poids en alliage de tungstène réduisaient l'amplitude des micro-vibrations de **30 à 40 %** ;
- Dans le même temps, dans l'application de la queue du rotor du drone militaire, l'erreur de contrôle du processus de décollage et d'atterrissage est réduite **d'environ 12 %**.

Grâce à la conception de la forme (comme le type T, le type H, intégré) et à l'optimisation de la méthode d'installation, l'alliage de tungstène peut encore améliorer l'efficacité de réponse et la capacité d'amortissement de la résonance du système de contrepoids dans différents axes et fréquences.

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT



Chapitre 3 Technologie de préparation du contrepoids en alliage de tungstène

Les contrepoids en alliage de tungstène déterminent directement la densité, les propriétés mécaniques et la précision dimensionnelle du produit. Ce chapitre se concentre sur la méthode de préparation principale des contrepoids en alliage de tungstène – la technologie de la métallurgie des poudres – ainsi que sur les aspects techniques clés tels que le contrôle des matières premières, les méthodes de formage, l'optimisation du frittage, l'usinage de précision et le nano-renforcement. Il présente en détail son processus de fabrication industrielle et sa stratégie de contrôle des paramètres de processus.

3.1 Principes de base de la métallurgie des poudres et flux de processus clés

La métallurgie des poudres (MP) est la technologie de base pour la fabrication des contrepoids en alliage de tungstène. Elle est particulièrement adaptée à l'usinage des métaux à point de fusion élevé (tels que le tungstène et le molybdène) et de leurs matériaux composites. Ce procédé consiste à mélanger de la poudre de tungstène avec des poudres métalliques de liaison (Ni, Fe, Cu, etc.), puis à les presser et à les fritter pour obtenir un bloc d'alliage de tungstène présentant une densité élevée, une forme contrôlable et d'excellentes performances.

Le processus est le suivant :

1. Préparation des matières premières (poudre de tungstène et poudre de liaison)
2. Mélange et broyage à boulets
3. Formage sous presse (uniaxial, pressage isostatique à froid, moulage par injection)

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

4. Pré-frittage et frittage en phase liquide
5. Usinage et traitement thermique
6. Traitement de surface et correction dimensionnelle
7. Contrôle qualité et livraison des produits

Ce procédé présente les avantages suivants :

- Des produits finis à haute densité avec une teneur en tungstène de 90 à 97 % peuvent être obtenus ;
- Après avoir contrôlé l'atmosphère et les paramètres de frittage, la densité du produit peut atteindre $\geq 99\%$;
- Faible coût, forte adaptabilité, capable de produire en masse des pièces complexes de formes spéciales et des pièces personnalisées en petites séries ;
- Par rapport à la méthode de moulage, la porosité est plus faible, la structure est plus uniforme et la fluctuation des performances est faible.

3.2 Préparation des matières premières et contrôle du rapport (poudre de tungstène, phase liante)

1) Exigences relatives aux caractéristiques de la poudre de tungstène :

- **Distribution granulométrique** : $D_{50} = 1-10\ \mu\text{m}$ est recommandé, et une poudre submicronique ($0,5\ \mu\text{m}$) est disponible pour les types spéciaux à haute densité ;
- **Sphéricité** : La poudre sphérique ($> 0,85$) est facile à compacter et présente un retrait de frittage uniforme ;
- **Surface spécifique** : $3\text{ à }6\ \text{m}^2/\text{g}$ est préférée, ce qui peut lier efficacement le métal de la phase liante ;
- **Exigences de pureté** : $W \geq 99,95\%$, teneur en oxygène $\leq 0,1\%$, impuretés (Mo, Si, Ca, etc.) $\leq 0,01\%$.

2) Poudre de phase liante (Ni, Fe, Cu) :

- Poudre ultrafine préparée sous atmosphère réductrice ;
- La taille des particules est généralement de $1\text{ à }5\ \mu\text{m}$, ce qui est hautement compatible avec la poudre de tungstène ;
- Le rapport est ajusté en fonction des différentes exigences de performances mécaniques et magnétiques :

Type d'alliage	Rapport Ni:Fe/Cu	Caractéristiques
W-Ni-Fe	7:3 ou 8:2	Haute résistance, fort magnétisme
W-Ni-Cu	9:1 ou 8:2	Type faiblement magnétique, adapté aux instruments de précision
W-Ni-Co	Réglable	Composants haute fréquence, forte résistance à la corrosion

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

3) Prémélange et broyage à boulets :

- Utiliser un broyeur à boulets humide, le solvant est l'éthanol ou la paraffine ;
- Rapport bille/matériau 5:1, temps de broyage 12–24 h ;
- Ajoutez des dispersants (tels que le PVA ou le PEG) pour améliorer l'uniformité du mélange.

3.3 Procédé de formage (moulage, pressage isostatique, moulage par injection, etc.)

1) Moulage par compression uniaxiale :

- Applicable aux produits de géométrie standard tels que les plaques, les blocs, les anneaux, etc.
- Plage de pression : **200–800 MPa** ;
- Le matériau du moule est du SKD11 ou de l'acier au carbure de tungstène pour garantir qu'il ne se fissurera pas sous haute pression ;
- la densité de prépresse peut atteindre 14-15,5 g/cm³ et la précision de formage est de $\pm 0,1$ mm.

2) Pressage isostatique à froid (NEP) :

- Convient aux contrepoids de grande taille et à haute densité ;
- La pression peut atteindre **300-400 MPa** , isobare à trois voies ;
- peut être amélioré de ≥ 10 %, et le risque de fissures peut être considérablement réduit ;
- Un usinage ultérieur, un rognage et une correction dimensionnelle sont nécessaires.

3) Moulage par injection de métal (MIM) :

- Utilisé pour les petites structures complexes (telles que les plaques de poids, les blocs de tungstène de type insert) ;
- La poudre est mélangée à un liant thermoplastique (paraffine + polymère) pour former des granulés ;
- Température d'injection 150–180°C, frittage après déliantage ;
- Les avantages sont une précision dimensionnelle élevée ($\pm 0,05$ mm), une aptitude à la production de masse et une grande complexité de forme.

3.4 Technologie de frittage (vide, phase liquide, contrôle de l'atmosphère)

La densification finale des poids en alliage de tungstène dépend de la technologie de frittage à haute température, en particulier **du frittage en phase liquide** , qui peut former des ponts en phase liquide entre les particules de tungstène à l'aide de métaux de liaison à bas point de fusion pour accélérer le processus de densification par frittage.

Équipement de frittage :

- Four de frittage sous vide (moins de 10^{-4} Pa)
- Four de protection à l'hydrogène (pureté $\geq 99,999\%$)

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

- Précision du contrôle de la température $\pm 5^{\circ}\text{C}$, uniformité de la température dans le four $\pm 10^{\circ}\text{C}$

Paramètres de frittage :

- Plage de température : **1400–1500°C**
- Temps de conservation : 4 à 12 h, selon la taille
- Vitesse de chauffage : 5–10°C/min pour éviter la formation de fissures
- Méthode de refroidissement : refroidissement naturel ou refroidissement par four

Contrôle de l'atmosphère :

- **Hydrogène** : forte propriété réductrice, empêche l'oxydation, convient aux alliages de tungstène de haute pureté
- **Vide** : Convient aux produits à faible teneur magnétique ou à faible teneur en oxygène
- **Gaz inerte (Ar/N₂)** : utilisé pour les produits à forte stabilité d'alliage

Méthode d'amélioration de la densité de frittage :

- Ajouter des matériaux auxiliaires en phase liquide (ajustement du rapport Ni, Cu) ;
- Utiliser des auxiliaires de frittage préactivés (tels que Cr, Ti) ;
- Une étape de pré-frittage (600–800°C) est introduite pour éliminer les impuretés et les films d'oxyde.

Après frittage, la densité du produit est généralement **de 17,5 à 18,3 g/cm³**, la microporosité est < 0,5 % et les indicateurs de dureté et de résistance peuvent atteindre les normes de qualité aéronautique.

3.5 Technologie d'usinage et de finition dimensionnelle

L'alliage de tungstène présente une dureté élevée et une grande fragilité, et sa difficulté de traitement est bien supérieure à celle des métaux ordinaires, nécessitant l'utilisation d'outils, de liquides de refroidissement et de voies de traitement spéciaux.

1) Coupe traditionnelle :

- **Tournage** : Utiliser des outils en carbure, vitesse < 100 m/min, profondeur de coupe $\leq 0,3$ mm ;
- **Fraisage** : Des fraises en bout sont recommandées, avec refroidissement par émulsion ;
- **Perçage/taraudage** : faible vitesse d'avance, utiliser un revêtement de foret (TiAlN) pour augmenter la durée de vie du foret ;
- La rugosité de la surface usinée peut atteindre Ra 1,2–3,2 μm .

2) Meulage et polissage :

- Meule diamantée, haute efficacité et faible déformation thermique ;

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

- Le polissage est réalisé avec une suspension d'oxyde d'alumine/cérium et la précision est contrôlée à Ra 0,5 µm.

3) Usinage par décharge électrique (EDM) :

- Convient aux pièces de forme spéciale, aux trous profonds et aux composants de contrepoids de type canal ;
- Les matériaux des électrodes sont principalement du graphite ou du cuivre, avec un espacement de 0,1 à 0,2 mm ;
- La rugosité de surface peut atteindre Ra 0,6 µm, ce qui convient aux pièces de dispositifs médicaux de précision.

4) Correction dimensionnelle 3D et mise en forme laser :

- Les produits de contrepoids haut de gamme tels que les collimateurs de haute précision et les blocs inertiels utilisent la technologie de correction laser ;
- La précision du contrôle dimensionnel peut atteindre $\pm 0,01$ mm.

3.6 Nanotechnologie et méthodes de renforcement à haute densité

Afin de dépasser les limites de la métallurgie des poudres traditionnelle et d'améliorer les performances de l'alliage de tungstène en termes de **haute résistance, de petite taille et de fonctions composites**, la nanotechnologie et les méthodes de renforcement des tissus sont devenues des points chauds de recherche ces dernières années.

Mécanisme de nano-amélioration :

- Les nanoparticules (telles que la poudre de nano-tungstène, le carbure de nano-tungstène) peuvent améliorer l'activité de frittage et la liaison des joints de grains ;
- L'alliage de tungstène nano-renforcé peut augmenter la résistance à la traction jusqu'à 15 % et la dureté d'environ 20 % ;
- Lors de la vérification China Tungsten Intelligent Manufacturing 2024, après avoir ajouté 2 % en poids de poudre de nano tungstène (< 100 nm), la densité a augmenté de 0,3 g/cm³ et la microporosité a diminué de 35 %.

Le renforcement par densification signifie :

- **Pressage isostatique à chaud (HIP)** : densification secondaire sous haute température et haute pression (1500°C/100 MPa) ;
- **Frittage multi-étages** : préfrittage à basse température – nucléation à moyenne température – densification à haute température pour éviter le grossissement des grains ;
- **Frittage rapide (SPS)** : en utilisant un courant pulsé pour chauffer instantanément, le temps de frittage est < 10 minutes et la taille des grains est contrôlée dans la plage de 1 à 3 µm.

Direction composite fonctionnelle :

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

- Présentation de nanotubes de graphène/carbone pour améliorer la conductivité et les performances de blindage électromagnétique ;
- Ajout d'éléments de terres rares (tels que La et Y) pour améliorer la résistance antioxydante et aux hautes températures ;
- Les revêtements nanométriques de surface (tels que TiN, B₄C) améliorent la résistance à l'usure et à la corrosion.

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

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

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



Chapitre 4 Tests de performance et évaluation de la qualité des contrepoids en alliage de tungstène

Les contrepoids en alliage de tungstène utilisés dans les équipements haut de gamme sont soumis à des exigences extrêmement strictes. Leur précision géométrique, leur résistance mécanique, la pureté de leurs composants et leur microstructure déterminent directement la fiabilité et la durée de vie du système de contrepoids. Par conséquent, lors de la fabrication et de l'application de contrepoids en alliage de tungstène, des tests de performance systématiques et des méthodes scientifiques d'évaluation de la qualité sont essentiels. Ce chapitre détaille les éléments clés tels que les tests de dimensions géométriques et de densité, les normes de performance mécanique, l'analyse métallographique, les tests des composants, le contrôle de la qualité de surface et les essais non destructifs, afin de constituer un système d'évaluation complet.

4.1 Dimensions géométriques et méthodes d'essai de densité

Les poids en alliage de tungstène sont souvent utilisés dans des systèmes où l'espace et la sensibilité au poids sont limités. La précision dimensionnelle et l'uniformité de la densité sont donc essentielles. Les méthodes de mesure géométrique couramment utilisées incluent les pieds à coulisse, les interféromètres laser et les machines à mesurer tridimensionnelles (MMT), avec une précision de mesure allant jusqu'à $\pm 0,01$ mm. Pour les structures géométriques complexes, les systèmes de balayage optique industriels peuvent également être utilisés pour l'analyse de correspondance des contours afin d'obtenir une détection tridimensionnelle sans contact de haute précision.

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

En termes de tests de densité, l'alliage de tungstène doit être vérifié par des méthodes de haute précision en raison de sa forte densité et de sa teneur en métal lourd. La méthode la plus couramment utilisée est la méthode d'Archimède, adaptée aux corps frittés denses. La formule de calcul est : , où et sont respectivement les poids dans l'air et dans l'eau.

Dans les situations haut de gamme, telles que l'industrie nucléaire ou les systèmes aéronautiques, la fluoroscopie de densité à rayons X, la technologie d'imagerie de densité laser et la mesure différentielle par microbalance peuvent également être utilisées pour garantir une distribution uniforme de la densité et éviter l'impact sur les performances dû aux vides locaux.

4.2 Normes d'essai des propriétés mécaniques (ASTM, ISO)

La résistance à la traction, la limite d'élasticité, l'allongement et la dureté de l'alliage de tungstène sont des indicateurs clés pour évaluer sa capacité portante. Conformément aux normes ASTM B777 et ISO 6892, une machine d'essai de matériaux universelle est utilisée pour les essais de traction. Les échantillons sont généralement des tiges rondes (6 mm de diamètre et 60 mm de longueur). La vitesse de charge et la température ambiante sont contrôlées pendant l'essai.

Les essais de dureté utilisent généralement la méthode Vickers (HV10), qui consiste à mesurer la moyenne de plus de trois points à différents endroits pour évaluer l'uniformité. Certains alliages de tungstène à haute résistance utilisent la méthode Brinell (HBW) ou la dureté Knoop (HK) en complément pour répondre aux exigences d'essai sous différentes charges.

Les essais de ténacité aux chocs sont réalisés à température ambiante ou à basse température (par exemple -40°C) sur la base d'éprouvettes de type Charpy V ou de la méthode Izod pour détecter sa résistance à la rupture, ce qui est particulièrement adapté aux occasions de charges dynamiques élevées militaires et aéronautiques.

Par ailleurs, les essais de performance en fatigue (fatigue à cycles élevés et faibles) et les essais de fluage gagnent également en importance. En 2024, de nombreuses entreprises ont intégré les essais de charge cyclique à leur processus de revue de processus. Les normes d'essai incluent notamment les normes ASTM E466 et ISO 1099.

4.3 Détection de la structure métallographique et de la microstructure

L'observation de la structure frittée au microscope métallographique (MO), au microscope électronique à balayage (MEB) et à la microscopie à sonde électronique (EPMA) permet d'évaluer les caractéristiques structurelles telles que la granulométrie, la porosité et la distribution des phases. L'uniformité de la structure est directement liée aux propriétés mécaniques et à la stabilité en service.

La métallographie optique (MO) est généralement utilisée pour identifier de manière préliminaire les joints de grains et la distribution biphasique ; la microscopie électronique à balayage (MEB)

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

fournit des images haute résolution pour l'observation des pores, des sources de fissures et des phases intermétalliques ; la spectroscopie dispersive en énergie (EDS), combinée à la MEB, est utilisée pour l'analyse de la composition des interfaces. La microscopie électronique à transmission (MET) permet d'observer les phases nanoprécipitées, la densité des dislocations et la structure des joints de grains, ce qui est adapté à la recherche scientifique et aux besoins d'évaluation avancée.

L'analyse de la granulométrie est souvent utilisée en conjonction avec un logiciel de traitement d'images (tel qu'ImageJ) pour calculer la granulométrie ASTM ; l'analyse de la porosité utilise la méthode de distribution des niveaux de gris de l'image et le calcul de la fraction volumique, et les résultats sont utilisés pour évaluer la qualité du frittage.

4.4 Analyse de la composition chimique (ICP, XRF)

Pour garantir la cohérence des matériaux et la sécurité d'utilisation, la teneur en W, Ni, Fe (ou Cu) des masses d'alliages de tungstène doit être analysée avec précision. Les méthodes courantes incluent la spectrométrie de masse à plasma à couplage inductif (ICP-MS) et la spectroscopie de fluorescence X (XRF).

L'ICP-MS offre une sensibilité extrêmement élevée et peut mesurer des impuretés de l'ordre du ppm, voire du ppb (comme le Mo, le Pb, le Ca, le Si, le C, etc.), ce qui est idéal pour les applications dans l'énergie nucléaire, l'aérospatiale et la médecine de pointe. Les alliages de tungstène utilisés pour les contrepoids nécessitent généralement une variation de la teneur en éléments principaux inférieure à $\pm 0,2$ % et une teneur totale en impuretés inférieure à 0,1 %.

La fluorescence X permet de déterminer rapidement la teneur en principaux composants de l'alliage et convient au suivi des lots de production. Elle présente l'avantage d'être non destructive et rapide. Pour éviter l'oxydation de surface, il est souvent nécessaire de polir l'échantillon ou de le tester sous protection argon.

ou une analyse du carbone et du soufre (CS) est également nécessaire pour contrôler la teneur en gaz afin d'empêcher l'oxydation ou les inclusions d'affecter la densité structurale et les performances de service.

4.5 Contrôle de la qualité de surface et de la rugosité

Les masselottes en alliage de tungstène sont souvent utilisées dans les pièces à ajustement serré, et leur qualité de surface affecte directement la précision de l'assemblage et la stabilité en service. La rugosité de surface est souvent exprimée en valeur Ra, et la cible est généralement de 0,8 à 1,6 μm . Les méthodes de test incluent un rugosimètre à stylet, un interféromètre à lumière blanche et un microscope confocal laser.

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

Pour les applications haut de gamme, telles que les contrepoids de gyroscopes aérospatiaux et les blocs d'équilibrage d'équipements CT, la valeur Ra peut être inférieure à 0,4 μm . Lors de l'inspection de surface, il convient également de prêter attention aux microfissures, au pelage, aux points d'oxydation, aux lignes de traitement et aux traces de couteau résiduelles. Il est nécessaire de combiner le système d'inspection visuelle à l'algorithme de reconnaissance automatique des défauts pour améliorer l'efficacité de l'inspection.

Si un revêtement de surface (tel que NiP, Cr, TiN, etc.) est utilisé pour améliorer la résistance à l'usure ou à la corrosion, des tests d'adhérence (ASTM D3359), une détection d'épaisseur (induction magnétique ou XRF) et une évaluation de l'uniformité du revêtement doivent également être effectués.

4.6 Technologie de contrôle non destructif (ultrasons, rayons X)

Pour les composants structurels clés, des contrôles non destructifs doivent être effectués afin de détecter les défauts internes. Les méthodes courantes incluent :

- Contrôle par ultrasons (UT) : Analyse des pores internes, des inclusions et des fissures grâce à la propagation d'ondes sonores à haute fréquence, adaptées aux contrepoids de grande taille ou à parois épaisses ;
- Contrôle aux rayons X (RT) : méthode d'imagerie à haute résolution permettant d'identifier le délaminage, le décollement, les trous et les zones de frittage incomplètes ;
- Scanner industriel : l'imagerie 3D est obtenue, ce qui permet l'analyse des défauts de formes complexes et de microcomposants. Grâce aux algorithmes d'IA, la classification et le traçage automatiques des défauts sont possibles.
- Test de particules magnétiques (MT) et test de ressuage (PT) : utilisés pour détecter les fissures de surface ou sous la surface et sont souvent utilisés dans l'étape d'inspection finale du processus.

Dans les applications pratiques, plusieurs méthodes CND sont souvent combinées pour former un système d'inspection composite. Par exemple, le processus d'inspection d'un composant de contrepoids aéronautique comprend un contrôle par ultrasons et tomographie ainsi qu'une détection des défauts de surface, ce qui augmente le taux de réussite de 15 % et réduit considérablement le taux de reprise.

En résumé, le système de test de performance et d'évaluation de la qualité des contrepoids en alliage de tungstène doit couvrir de multiples dimensions, notamment la taille macroscopique, la microstructure, les propriétés physiques et chimiques et la fiabilité globale, condition essentielle pour garantir la stabilité de leur fonctionnement dans des conditions extrêmes. Face à l'augmentation constante des exigences en matière de fiabilité, de traçabilité et de cohérence des lots de contrepoids, l'évaluation future de la qualité s'appuiera davantage sur l'intégration multi-technologies, la

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

détection intelligente et les méthodes d'analyse basées sur les données pour soutenir la modernisation numérique et intelligente de la fabrication de contrepoids en alliage de tungstène.

www.chinatungsten.com

www.chinatungsten.com

en.com

www.chinatungsten.com

www.chinatungsten.com

chinatungsten.com

www.chinatungsten.com

www.chinatun

1

www.chinatungsten.com

www.chinatungsten.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

电话/TEL: 0086 592 512 9696
CTIAQCD-MA-E/P 2018-2024V
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/cm³), 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

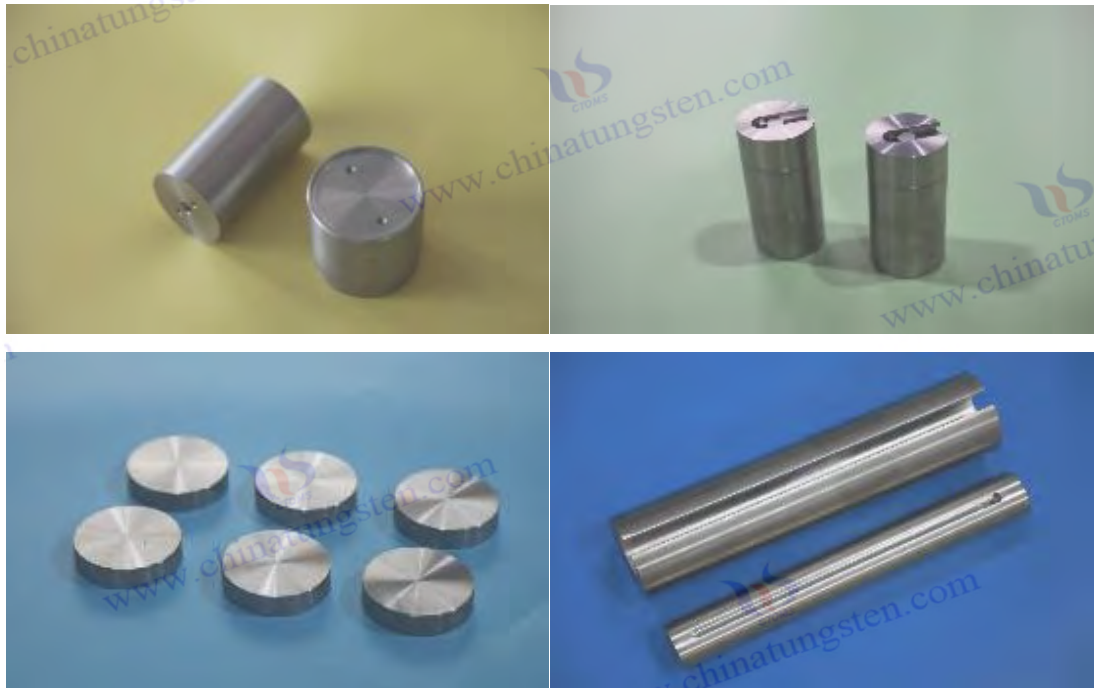
1 billion+ visits to the official website, 1 million+ web pages, 100,000+ customers, 0 complaints in 30 years!

Contact us

Email: sales@chinatungsten.com

Tel: +86 592 5129696

Official website: 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

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



Chapitre 5 Application des contrepoids en alliage de tungstène dans l'aérospatiale

L'alliage de tungstène est devenu un matériau important pour la conception de contrepoids dans le secteur aérospatial en raison de sa densité élevée, de sa résistance élevée, de son excellente résistance à la corrosion et de sa bonne stabilité thermique. Une conception et une utilisation judicieuses des contrepoids sont non seulement liées aux performances, à la sécurité et à la durée de vie de l'avion, mais affectent également directement la réactivité et la précision du système de commandes de vol. Ce chapitre présente les principales applications des contrepoids en alliage de tungstène dans les avions, les satellites, les fusées et les systèmes d'armes de défense.

5.1 Réglage du centre de gravité de l'avion et poids d'équilibrage des commandes de vol

Dans la conception et l'exploitation des avions modernes, le contrôle précis du centre de gravité est essentiel pour garantir la sécurité et les performances en vol. En particulier pour les plateformes aéronautiques de haute technologie telles que les chasseurs militaires, les avions d'affaires, les gros porteurs civils et les avions hypersoniques, un système de contrepoids adapté affecte non seulement la stabilité du vol et la sensibilité des commandes, mais détermine également directement la durée de vie structurelle et le coût d'exploitation de l'appareil. Les contrepoids en alliage de tungstène sont devenus un matériau essentiel pour le réglage du centre de gravité en aviation, en raison de leur densité élevée, de leur faible encombrement, de leur stabilité structurelle et de leur adaptabilité environnementale.

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

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

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

5.1.1 Importance du centre de gravité de l'aéronef

En tant qu'aéronef motorisé, l'attitude de vol d'un avion dépend de l'interaction entre le centre de gravité et le centre aérodynamique. Le centre de gravité (CG) doit être contrôlé dans une certaine plage et légèrement en avant du centre de portance pour assurer la stabilité du vol et une bonne maniabilité. Si le centre de gravité est incliné vers l'avant, le nez de l'avion sera trop lourd, la portance insuffisante et le décollage difficile ; s'il est incliné vers l'arrière, la queue risque d'être trop lourde, l'assiette instable, voire le décrochage.

De plus, le centre de gravité a un impact significatif sur les indicateurs de performance suivants :

- **Adaptation de la portance et de la traînée de l'avion** : l'excentricité augmentera l'angle d'attaque nécessaire au réglage de l'attitude, ce qui entraînera une traînée supplémentaire ;
- **Économie de carburant et autonomie** : Si le centre de gravité s'écarte de la valeur de conception, le système de contrôle de vol automatique ajustera fréquemment l'attitude, augmentant ainsi la consommation de carburant ;
- **Sécurité des vols et durée de vie structurelle** : les positions extrêmes du centre de gravité sont susceptibles de provoquer des fissures de fatigue structurelle et des accidents de perte de contrôle.

Il est donc nécessaire d'utiliser une conception de contrepoids précise pour disposer des blocs de masse à haute densité dans différentes structures du fuselage afin d'obtenir un réglage fin et une optimisation du centre de gravité.

5.1.2 Avantages des contrepoids en alliage de tungstène

L'alliage de tungstène (W-Ni-Fe, W-Ni-Cu, etc.) présente les avantages suivants dans les systèmes de contrepoids d'aéronefs en raison de ses excellentes propriétés physiques et chimiques :

- **ultra-haute densité**
présente une plage de densité comprise entre 17,0 et 18,5 g/cm³, ce qui est bien supérieur à celui de l'acier traditionnel (environ 7,8 g/cm³) et de l'alliage d'aluminium (environ 2,7 g/cm³), et est également supérieur à celui du plomb (11,3 g/cm³). Cela permet à l'alliage de tungstène d'offrir une masse suffisante dans un espace très réduit, ce qui le rend idéal pour les structures complexes et compactes, telles que les extrémités d'ailes, les gouvernes de direction et l'intérieur des trains d'atterrissage.
- **Excellente résistance mécanique et résistance à la fatigue.**
L'alliage de tungstène présente une résistance élevée à la traction (> 700 MPa) et une excellente résistance à la fatigue. Il résiste aux charges de force G élevées, aux vibrations à grande vitesse et aux charges cycliques prolongées, garantissant ainsi un fonctionnement stable et durable du contrepoids.
- **Adaptabilité aux environnements à haute température :**
Le point de fusion du tungstène atteint 3410°C et son alliage présente également une

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

excellente stabilité thermique à haute température, ce qui le rend très adapté aux zones présentant des différences de température drastiques telles que la périphérie du moteur et les zones de nettoyage à flux d'air à grande vitesse.

- **Respectueux de l'environnement et non toxique.**

Comparé aux matériaux à base de plomb, l'alliage de tungstène est non toxique et non radioactif pour le corps humain. Il est conforme aux réglementations environnementales internationales telles que REACH et RoHS, et convient aux applications soumises à des exigences environnementales strictes, comme les avions de ligne et les jets d'affaires.

5.1.3 Application spécifique du réglage du centre de gravité de l'aéronef

Les contrepoids en alliage de tungstène sont largement utilisés dans les systèmes aéronautiques, principalement dans les aspects suivants :

- Lors de la fabrication et de l'installation, les différentes gouvernes de l'avion sont déséquilibrées en raison d'une répartition inégale des masses, **ce qui** affecte la précision des commandes de vol et la stabilité aérodynamique. Des contrepoids en alliage **de tungstène** sont intégrés à la gouverne ou fixés sur son bord de fuite pour ajuster précisément la position du centre de gravité, afin que la gouverne de direction maintienne son équilibre statique et dynamique.

- **Compartiment du train d'atterrissage et contrepoids de réglage fin interne de l'aile principale.**

Le train d'atterrissage provoque une importante fluctuation du centre de gravité lors des phases de rétraction et d'extension. Des blocs en alliage de tungstène peuvent être installés dans le compartiment du train d'atterrissage ou dans la structure de l'aile principale pour compenser cette fluctuation grâce à des contrepoids de précision, garantissant ainsi la stabilité du centre de gravité longitudinal pendant le vol.

- **Optimisation de l'équilibre du cockpit et de l'électronique de bord.**

Lorsque des composants électroniques denses sont disposés dans le cockpit et le compartiment d'instruments avant, la structure semble souvent lourde en tête et légère en queue. Dans ce cas, des contrepoids en alliage de tungstène peuvent être disposés à l'arrière ou au milieu afin d'ajuster le centre de gravité de l'ensemble de l'avion et d'améliorer la stabilité de l'attitude de vol.

- **Le réglage de la charge des aéronefs à usage spécifique,**

tels que les drones de reconnaissance et les avions de chasse, nécessite un ajustement rapide du poids en fonction du type et de la position du support. Le système de poids modulaire en alliage de tungstène permet un montage et un démontage rapides, améliorant ainsi l'efficacité au combat et la sécurité des vols.

- **Mécanisme de compensation de la consommation de carburant.**

Lors des vols longue distance, la consommation de carburant dans le réservoir avant ou central entraîne un déplacement du centre de gravité vers l'arrière. L'avion peut préinstaller des contrepoids en alliage de tungstène à l'empennage pour compenser, garantissant ainsi

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

que le centre de gravité de l'ensemble de l'avion reste toujours dans les limites de sécurité, améliorant ainsi l'efficacité du vol et la redondance de sécurité.

5.1.4 Considérations relatives à la conception et à l'installation

les contrepoids en alliage de tungstène dans les structures d'aéronefs doivent respecter strictement les principes suivants :

- **Conception structurelle sur mesure :**
La répartition du poids requise pour chaque modèle d'avion, et même pour chaque appareil, est différente. La forme, la taille et la répartition de la masse des blocs de masse en alliage de tungstène doivent être personnalisées en fonction du modèle CAO de l'avion et des données de simulation par éléments finis. Les formes géométriques courantes comprennent les bandes longues, les blocs, les cylindres et les modules intégrés.
- **des méthodes de connexion et des méthodes d'installation de contrepoids intégrés structurels**
sont généralement utilisées :
 1. **Fixation par boulon/rivet** : convient aux pièces d'entretien amovibles de la structure pour faciliter la réparation ou le remplacement.
 2. **Enrobage et incorporation de matériaux composites** : Incorporez un alliage de tungstène dans un gouvernail ou un cadre structurel en composite de fibre de carbone pour réduire le poids tout en améliorant la résistance à la chaleur et à la corrosion.
 3. **Module de contrepoids coulissant réglable** : utilisé dans les avions d'essai ou les avions expérimentaux, la position peut être ajustée de manière flexible pour optimiser les paramètres de vol.
- **Conception adaptable à l'environnement.**
Les contrepoids d'avion doivent s'adapter aux conditions de vol, telles que haute altitude et basse pression, alternance de chaud et de froid et fortes vibrations. C'est pourquoi la surface des blocs en alliage de tungstène est généralement anodisée, fluorée ou métallisée par dépôt physique en phase vapeur (PVD) pour prévenir l'oxydation et la corrosion.
- **Conception de sécurité redondante :**
tous les contrepoids doivent être fixés de manière fiable à 100 % et ne pas risquer de tomber en vol. En cas de défaillance de la structure de connexion, plusieurs mécanismes redondants doivent être envisagés lors de la conception, tels que des boulons anti-desserrage, des butées de fin de course, des adhésifs et des colles structurelles.

5.1.5 Études de cas et tendances de développement

- **Cas : Le système de contrepoids en tungstène du compartiment de queue d'un avion d'affaires long-courrier**
est disposé près du compartiment électronique à l'arrière de l'appareil. Un module de contrepoids personnalisé en alliage de tungstène est installé. La masse totale du contrepoids

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

est de 45 kg, ce qui permet de contrôler efficacement l'écart du centre de gravité à $\pm 1,5\%$ tout au long du vol, améliorant ainsi considérablement l'autonomie et la stabilité.

- **Cas : Mécanisme de réglage fin du contrepoids de la gouverne de direction des avions de chasse militaires** . Des micro-poids en alliage de tungstène permettent d'ajuster la sensibilité de réponse des gouvernes. Leur position peut être ajustée avec précision via le port de maintenance et ils forment un contrôle de compensation en boucle fermée en conjonction avec le système de commandes de vol numériques.
- **Tendances futures**
Avec le développement du contrôle de vol intelligent et de l'intégration multi-capteurs, le système de contrepoids évoluera également vers **un système de contrepoids adaptatif** : la position et la masse du module de contrepoids sont ajustées par des actionneurs intelligents pour obtenir un contrôle du centre de gravité en temps réel pendant le vol. Dans le même temps, **les matériaux composites en alliage de tungstène**, **les structures en tungstène imprimées en 3D** et **la technologie de contrepoids intégré au module haute énergie tungstène-lithium** apporteront également de nouveaux changements à la conception des contrepoids de l'aviation.

5.2 Contrepoids du satellite et système de contrôle inertiel

Dans le système de contrôle d'attitude et de stabilisation d'orbite des engins spatiaux, la conception des contrepoids est une tâche d'ingénierie cruciale. En particulier pour les satellites modernes équipés d'instruments de haute précision et de modules de contrôle complexes, le fonctionnement précis et durable de leurs systèmes de stabilité d'attitude et d'inertie dépend d'un contrôle qualité structural extrêmement strict. L'alliage de tungstène, matériau de base des contrepoids des systèmes de contrôle inertiel des engins spatiaux contemporains, est largement utilisé dans les composants de mesure inertielle, les gyroscopes, les systèmes de roues inertielles et les structures de réglage du centre de gravité des satellites, en raison de sa densité élevée, de ses excellentes propriétés thermiques et de ses propriétés mécaniques stables.

5.2.1 Introduction au système de contrôle inertiel par satellite

Lorsqu'un satellite est en orbite, il doit maintenir une stabilité d'attitude et des capacités de contrôle d'orbite extrêmement précises pour assurer la mise en œuvre stable de tâches telles que la communication, la télédétection, la navigation et l'exploration scientifique. Cette tâche est principalement assurée par le système de contrôle inertiel (ICS), dont les principaux composants sont :

- **Unité de mesure inertielle (IMU)** : Elle est composée d'un accéléromètre et d'un gyroscope et est utilisée pour détecter les changements d'accélération linéaire et de vitesse angulaire du satellite dans l'espace tridimensionnel en temps réel.
- **Ensemble de roue de réaction (RWA)** : utilisé pour le maintien et le contrôle de l'attitude, en modifiant le moment angulaire du satellite en ajustant la vitesse du volant d'inertie.

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

- **Roues d'impulsion et gyroscopes à moment de contrôle (CMG) :** fournissent une sortie stable pour un contrôle de haute précision et sont largement utilisés dans les satellites de télédétection haute résolution et les télescopes spatiaux.

Dans ces systèmes, les performances des éléments inertiels dépendent fortement de l'équilibre dynamique et de la concentration massique du système de contrepoids. Des contrepoids en alliage de tungstène sont intégrés au volant d'inertie, au boîtier du gyroscope ou à la base du système pour ajuster avec précision le moment d'inertie et améliorer la stabilité du système inertiel.

5.2.2 Avantages de l'alliage de tungstène dans les contrepoids de satellites

L'alliage de tungstène utilisé dans les contrepoids aérospatiaux est un symbole majeur du développement des matériaux aérospatiaux. Ses avantages se reflètent dans plusieurs aspects clés :

- **Densité extrêmement élevée, gain de volume et de masse.**
La densité de l'alliage de tungstène, atteignant 18,0-18,5 g/cm³, permet d'obtenir un contrepoids de haute qualité dans une structure très compacte, répondant aux contraintes d'espace et de poids strictes des satellites miniaturisés et légers. Cet alliage est particulièrement important pour les nouveaux engins spatiaux tels que les microsatellites, les nanosatellites et les CubeSat.
- **Excellente stabilité thermique :**
les satellites subissent des écarts de température allant de -200 °C à plus de +150 °C en orbite. L'alliage de tungstène présente un faible coefficient de dilatation thermique (environ $4,5 \times 10^{-6}/K$), une bonne conductivité thermique et une grande stabilité structurelle. Il n'entraîne ni concentration de contraintes ni déplacement de masse dus à la dilatation et à la contraction thermiques, garantissant ainsi un fonctionnement stable à long terme du système inertiel.
- **Excellente résistance mécanique et durabilité.**
L'alliage de tungstène présente une résistance à la traction supérieure à 700 MPa et une limite de fatigue très élevée. Il résiste aux fortes vibrations, aux chocs et à l'abrasion aérodynamique supersonique lors du lancement du vaisseau spatial, garantissant ainsi que la structure du contrepoids ne se déformera, ne se desserrera ni ne sera endommagée pendant plus de dix ans d'exploitation orbitale.
- **Amagnétique et faible taux de fuite de gaz.**
Pour les satellites scientifiques ou les plateformes optiques aux exigences de propreté magnétique extrêmement élevées, l'utilisation d'alliages de tungstène faiblement magnétiques tels que le W-Ni-Cu permet d'éviter les interférences du champ magnétique. Parallèlement, son faible taux de fuite garantit l'absence de rejet de gaz pollué dans un environnement sous vide, répondant ainsi aux normes de propreté des applications spatiales.

5.2.3 Pratique de conception des contrepoids inertiels des satellites

L'alliage de tungstène dans le système de contrepoids de satellite peut être résumé dans les applications typiques suivantes :

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

- **Volant d'inertie/contreponds de réaction.**

Le volant d'inertie est l'unité motrice principale du réglage d'attitude, et son moment angulaire de sortie est étroitement lié au moment d'inertie. En disposant des contreponds en alliage de tungstène sur la circonférence du volant, la capacité de moment angulaire peut être améliorée sans augmenter significativement la taille du volant, ce qui permet une réponse plus rapide du réglage d'attitude et une plus grande marge de contrôle.

- **Dans le système gyroscopique**

, l'alliage de tungstène est utilisé comme masselotte du rotor ou du boîtier afin de réduire la déviation non linéaire du système et d'améliorer la précision des mesures d'attitude. Dans certains gyroscopes à fibre optique et gyroscopes micromécaniques (gyroscopes MEMS) haut de gamme, des masselottes en tungstène ultra-compactes sont également utilisées pour optimiser les caractéristiques de réponse du capteur.

- **Système de réglage fin du centre de gravité de l'ensemble du satellite.**

Lors de l'assemblage du satellite ou de l'intégration de la charge utile, afin d'obtenir un centre de gravité correspondant précisément aux exigences d'attitude orbitale, un contreponds remplaçable en alliage de tungstène est souvent préréglé dans le cadre structurel pour atteindre la position prévue du centre de gravité par un réglage dynamique de la distribution. Cette conception offre une flexibilité extrêmement élevée lors de la phase de débogage au sol.

- **Système de contreponds anti-micro-perturbations et anti-résonance.**

En orbite, le satellite est soumis à des perturbations telles que le gradient gravitationnel, la pression solaire et le champ géomagnétique, qui peuvent facilement induire des vibrations structurelles. À une fréquence donnée, des blocs d'alliage de tungstène peuvent être combinés à des matériaux hautement amortissants (tels que des composites à base de silicone et d'aluminium) pour former un système de contreponds amortissant. Il permet d'absorber l'énergie des micro-vibrations et d'améliorer la stabilité des plateformes d'imagerie ou des plateformes de charges utiles scientifiques.

5.2.4 Tendances de développement futures

Alors que la technologie spatiale évolue vers la « miniaturisation, la haute fiabilité et l'intelligence », le développement de l'alliage de tungstène dans les systèmes de contreponds de satellites montre également les tendances suivantes :

- **Les satellites cubiques et les réseaux de constellations nécessitent un réglage précis du contreponds**

dans un volume très réduit. Des modules ultra-compactes en alliage de tungstène (tels que des paillettes et des granulés de moins de 1 g) sont utilisés en conjonction avec des mécanismes de montage mobiles (tels que des microglissières et des modules magnétiques) pour obtenir un réglage du centre de gravité au micron près, contribuant ainsi à la construction d'un système de petits satellites à faible coût et hautes performances.

- **Impression 3D et fabrication intelligente d'alliages de tungstène Avec le développement de**

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

technologies de fabrication additive telles que la fusion sur lit de poudre (SLM) et la fusion par faisceau d'électrons (EBM) dans le domaine des métaux réfractaires, les composants inertiels en alliage de tungstène atteindront à l'avenir un moulage monobloc de forme spéciale et une intégration de fonctions structurelles, améliorant considérablement la compacité structurelle et l'efficacité d'assemblage des composants de contrepoids.

- **Le système de contrepoids dynamique intelligent**
est destiné aux télescopes spatiaux, aux grands radars et aux satellites à changement d'orbite à grande vitesse. À l'avenir, il explorera le « contrepoids adaptatif » couplé au système inertiels, utilisera des micromoteurs ou des entraînements électrothermiques pour ajuster en ligne la position du contrepoids et améliorera les capacités d'autostabilisation et d'autoréparation du système.
- **Matériaux verts et alliages de tungstène recyclables**
. Face aux tendances en matière de contrôle des débris spatiaux et de fabrication durable, les alliages de tungstène destinés à l'aéronautique évoluent également vers la recyclabilité et une faible pollution. De nouveaux alliages de tungstène respectueux de l'environnement (comme les liants sans nickel ni cobalt) deviendront le matériau de choix pour la prochaine génération de contrepoids de systèmes inertiels aéronautiques.

5.3 Technologie de poids de queue de fusée et de missile

Dans les systèmes d'armes aéronautiques et les véhicules spatiaux modernes, la dérive, en tant que surface de contrôle aérodynamique clé, détermine non seulement la capacité d'ajustement de l'attitude de vol, mais affecte aussi directement la stabilité et la précision du contrôle de la trajectoire. En vol hypersonique, lors de virages complexes ou en combat à forte surcharge, la réactivité dynamique et la stabilité structurelle de la dérive sont particulièrement importantes. Afin de répondre à ces exigences strictes, la technologie des contrepoids en alliage de tungstène est devenue un élément indispensable de la conception des dérives des fusées et des missiles.

5.3.1 Présentation de la queue de fusée et du contrôle de vol du missile

Le contrôle de la stabilité et de la manœuvrabilité des roquettes et des missiles repose sur le fonctionnement coordonné de plusieurs composants clés, dont la queue, principal actionneur pour le réglage de l'attitude et la stabilité dynamique. La queue modifie la direction du flux d'air afin de générer des forces aérodynamiques latérales ou en tangage, permettant ainsi le réglage du cap, le contrôle de l'attitude et la correction du guidage terminal.

Selon les différentes utilisations et configurations, les ailerons arrière peuvent être divisés dans les catégories suivantes :

- **Aileron fixe** : Couramment utilisé dans les fusées à vitesse moyenne et basse, il a une structure simple et offre une stabilité de base.
- **Aileron mobile** : le servomoteur permet un réglage d'attitude en temps réel pendant le vol.

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

- **Ailerons de queue pliables ou déployables** : utilisés sur les fusées portables ou à plusieurs étages, qui sont dépliés après le lancement pour économiser de l'espace dans le tube de lancement.
- **Poussée vectorielle avec queue contrôlée** : utilisée en conjonction avec le réglage de la poussée vectorielle du moteur pour améliorer la grande maniabilité.

Dans ces conceptions, la répartition des masses, le moment d'inertie et la résistance structurelle de la queue influencent directement l'efficacité du système de commandes de vol. Le contrepoids en alliage de tungstène, conçu avec précision, permet non seulement d'optimiser le centre de gravité de l'avion, mais aussi d'améliorer considérablement la stabilité de la réponse dynamique de la queue, un élément clé de l'intégration des systèmes de commandes de vol modernes.

5.3.2 Avantages de l'utilisation de poids en alliage de tungstène dans les dérives

L'alliage de tungstène est devenu le matériau privilégié pour les masselottes de queue de fusées et de missiles en raison de ses excellentes propriétés physiques et mécaniques. Ses principaux avantages sont les suivants :

- **Densité extrêmement élevée, offrant une qualité élevée dans un volume réduit. La densité du contrepoids en alliage de tungstène**
atteint 18,0-18,5 g/cm³, soit 2,4 fois celle de l'acier et plus de 7 fois celle de l'aluminium. Dans une position compacte comme l'aileron arrière, soumise à des exigences strictes en matière de performances aérodynamiques, l'obtention de la masse requise dans un format compact permet de réduire la résistance à l'air, de conserver une forme profilée et d'optimiser la disposition du centre de gravité de l'avion.
- **Excellente résistance mécanique et résistance aux chocs :**
la résistance à la compression de l'alliage de tungstène dépasse 1000 MPa, ce qui peut résister à des impacts violents, des surcharges, des couples de rotation et des vibrations instantanées générées pendant le vol, garantissant efficacement l'intégrité de la structure de la queue.
- **Excellente résistance aux hautes températures et à la corrosion.**
Lorsque les fusées et les missiles volent dans des zones de flux thermique élevé dans l'atmosphère, la surface de la queue peut être exposée à des températures instantanées de plusieurs centaines de degrés. L'alliage de tungstène a un point de fusion allant jusqu'à 3420 °C et ne se déforme pas facilement, même en cas de choc thermique. De plus, sa résistance à l'oxydation et aux acides est supérieure à celle de la plupart des métaux, ce qui garantit la stabilité des performances du contrepoids en service à long terme.
- **Matériaux optionnels non magnétiques/faiblement magnétiques**
Certains missiles tactiques et roquettes de précision sont extrêmement sensibles aux interférences magnétiques. Des alliages de tungstène faiblement magnétiques W-Ni-Cu peuvent être sélectionnés pour garantir que le contrepoids n'interfère pas avec les équipements électroniques de navigation et de détection d'attitude.

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

5.3.3 Points clés de la conception du contrepoids de queue

L'objectif du lestage de la queue est d'améliorer la stabilité, la réactivité et la précision des commandes de vol grâce à une configuration précise des masses. Les points clés suivants doivent être pris en compte lors de la conception :

- **Réglage et optimisation de la répartition de la gravité.**

La queue étant éloignée du centre de l'avion, son contrepoids a un impact plus important sur le centre de gravité global. En disposant judicieusement des blocs d'alliage de tungstène à l'intérieur de la queue ou à l'emplanture de l'aile, le centre de gravité longitudinal ou en tangage de l'avion peut être ajusté avec précision pour obtenir un équilibre dynamique, particulièrement adapté aux missiles à haute mobilité et aux fusées orbitales à grande vitesse.

- **Améliorer la réactivité et la stabilité des commandes de vol.**

Le poids de la queue permet d'ajuster le moment d'inertie local pour améliorer la stabilité de vol. Dans le système de contrôle automatique, cela permet de supprimer la réponse non linéaire de la queue causée par les perturbations et d'éviter les corrections excessives qui entraînent une dérive de la trajectoire de vol.

- **Intégration structurelle et conception intégrée :**

les structures de missiles modernes sont généralement légères et intégrées. Les contrepoids en alliage de tungstène sont généralement conçus en coordination avec les structures de dérive en composite de fibre de carbone et intégrés de manière encastrée, emboîtée ou collée afin de réduire le nombre de vis, de soudures et autres connecteurs, d'améliorer la fiabilité et de simplifier la maintenance.

- **La conception d'optimisation aérodynamique**

de la disposition du contrepoids doit être combinée à une analyse CFD (dynamique des fluides numérique) pour garantir qu'elle ne détruit pas la répartition de la portance de l'aile arrière ou ne provoque pas d'interférence de vortex, maintenant ainsi une bonne efficacité aérodynamique de vol.

5.3.4 Analyse de cas d'application

La technologie des lests de queue en alliage de tungstène est largement utilisée dans de nombreux types de fusées et de systèmes de missiles. Voici deux exemples typiques :

- **Optimisation du système de lestage de queue des missiles air-sol.**

Un certain type de missile air-sol à guidage de précision utilise une dérive composite pliable, avec un petit bloc de contrepoids en alliage de tungstène disposé près de la charnière de queue. En améliorant la stabilité et la vitesse de réponse de la dérive après pliage et dépliage, l'attitude de vol terminale du missile est plus stable. Les données de mesure réelles montrent que la précision de frappe est améliorée de 10 % et la capacité anti-interférence est améliorée de 25 %.

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

- **Conception du contrôle de stabilité d'un lanceur de petits satellites.**

Un lanceur orbital léger utilise des bandes en alliage de tungstène sur mesure de chaque côté de la dérive. Ces bandes sont intégrées à la structure composite de l'aile par emboîtement structurel afin d'ajuster la stabilité en tangage et en lacet de l'appareil. Cette conception réduit efficacement le problème d'oscillation en lacet au début du lancement et rapproche la trajectoire de lancement de la courbe théorique.

5.3.5 Tendances de développement futures

Avec le développement des armes hypersoniques et des plateformes de frappe de précision intelligentes, la technologie des systèmes de poids de queue évolue également, et les tendances suivantes pourraient émerger à l'avenir :

- **Contrepoids micro intelligent et technologie de réponse dynamique**

Les futures ailes arrière pourraient adopter un système de contrepoids micro variable basé sur une structure MEMS, combiné à un servo-contrôleur et à un algorithme intelligent pour obtenir un réglage fin de la répartition de la masse pendant le vol afin de s'adapter aux différentes phases de vol et environnements aérodynamiques.

- **sur le développement de l'intégration fonctionnelle des**

matériaux composites à base de tungstène, combine l'alliage de tungstène avec des matériaux légers tels que la fibre de carbone et la matrice céramique pour fabriquer une aile de queue composite dotée de fonctions de contrepoids, de support structurel et de protection thermique, améliorant ainsi l'efficacité globale d'utilisation du poids.

- **La conception du contrepoids à faible visibilité radar**

est destinée aux missiles furtifs et aux avions faiblement détectables. La conception du contrepoids doit prendre en compte les caractéristiques de réflexion des ondes électromagnétiques et minimiser la surface équivalente radar (SCR) grâce au revêtement des matériaux et à l'optimisation de la forme.

- **La structure d'aile arrière intégrée fabriquée de manière additive**

utilise la technologie d'impression 3D pour imprimer simultanément le module de contrepoids en alliage de tungstène et le cadre d'aile arrière, le formant en une seule pièce et l'intégrant de manière transparente, ce qui raccourcit le cycle de production, augmente la liberté de conception et offre plus d'espace pour une optimisation aérodynamique complexe.

5.4 Contrôle des vibrations de l'aéronef et masse de réaction

Avec l'amélioration continue des performances des avions modernes, la demande de structures légères et de vols à grande vitesse a entraîné des problèmes de vibrations plus complexes en exploitation. Qu'il s'agisse d'un avion de ligne, d'un drone, d'un missile ou d'un satellite, il est affecté par des facteurs tels que le fonctionnement du moteur, la résonance structurelle, les perturbations aérodynamiques et les variations de charges opérationnelles en vol, provoquant des vibrations. Afin de garantir l'intégrité structurelle de l'avion, la stabilité du système de commandes de vol, ainsi que la sécurité et le confort du personnel et des équipements, des stratégies efficaces de contrôle des

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

vibrations doivent être adoptées. Parmi elles, la technologie des blocs de masse de réaction, en tant que méthode passive ou semi-active de réduction des vibrations, joue un rôle de plus en plus important dans les systèmes de contrôle des vibrations aéronautiques.

L'alliage de tungstène, grâce à sa densité ultra-élevée et à son excellente stabilité mécanique et thermique, est devenu le matériau privilégié pour la fabrication de blocs de masses de réaction. Sa compacité, sa résistance à la fatigue et à la corrosion lui permettent d'obtenir une suppression efficace et durable des vibrations dans les environnements de vol extrêmes.

5.4.1 Aperçu des problèmes de vibrations des aéronefs

Les problèmes de vibrations rencontrés par les avions en vol sont complexes et divers, et les principales sources incluent :

- **Fonctionnement du moteur** : Les composants rotatifs à grande vitesse tels que les turbines, les compresseurs et les arbres d'hélice provoquent des vibrations mécaniques périodiques, particulièrement perceptibles lors des phases d'accélération au décollage et de changement de poussée.
- **Perturbation aérodynamique** : Lors d'un vol à grande vitesse, l'excitation instable du flux d'air sur les ailes, la queue et d'autres structures externes peut induire une résonance structurelle.
- **Vibrations auto-excitées structurelles** : Dans certaines conditions de fonctionnement, des vibrations couplées peuvent se produire entre les équipements internes et les composants de l'aéronef, provoquant ainsi une expansion des vibrations de l'ensemble de l'aéronef.
- **Changements de charge opérationnelle** : Les changements rapides de surcharge causés par le contrôle du pilote, le réglage de l'attitude ou le vol de manœuvre provoqueront une réponse dynamique instantanée de la structure.

Si ces vibrations ne sont pas contrôlées efficacement, elles peuvent entraîner les conséquences suivantes :

- La fatigue structurelle accélérée raccourcit la durée de vie des composants clés ;
- Augmentation des erreurs de navigation et de contrôle d'attitude ;
- La précision de mesure de l'instrument diminue et les données sont déformées ;
- Confort réduit pour le personnel de bord ;
- Dans certains cas, cela peut provoquer une instabilité du système et affecter la sécurité du vol.

Par conséquent, la technologie de réduction des vibrations est devenue l'un des principaux domaines de préoccupation commune pour l'ingénierie structurelle, les systèmes d'alimentation et les systèmes électroniques dans la conception des aéronefs.

5.4.2 Mécanisme de la masse réactionnelle

La masse de réaction est un élément structurel réduisant les vibrations, fonctionnant selon le principe d'un système « masse-ressort-amortisseur ». L'idée principale est la suivante :

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

En utilisant un groupe de blocs de masse spécifique, lorsque le système vibre, une force de réaction dans la direction opposée à la structure principale est générée par inertie, compensant ainsi une partie ou la totalité de l'énergie de vibration.

Les blocs de masse de réaction peuvent être divisés en types suivants en fonction de leur forme structurelle et de leur méthode de contrôle :

- **Type passif** : utilise l'adaptation de fréquence naturelle et conçoit sa fréquence de résonance pour qu'elle soit proche de la fréquence de vibration structurelle afin d'atteindre l'objectif de réduction des vibrations.
- **Amortisseur de masse semi-actif/accordé (TMD)** : Améliore l'adaptabilité en ajustant l'amplitude de réponse grâce à des matériaux d'amortissement ou des supports de contrôle.
- **Contrôle actif des vibrations** : combine des dispositifs électromagnétiques ou hydrauliques pour un réglage de la réponse en temps réel, mais est rarement utilisé dans le domaine aérospatial.

L'alliage de tungstène permet de concentrer la masse dans un volume très réduit, ce qui accroît la force de réaction et la réponse en fréquence, ce qui est particulièrement adapté aux applications aéronautiques compactes et aux fréquences de vibration claires. Par exemple, sur les plateformes satellites ou les cabines de contrôle d'attitude de missiles, où le volume est strictement limité, les blocs de réaction en alliage de tungstène peuvent remplacer efficacement les grands systèmes à ressorts pour une conception compacte et efficace en termes de réduction des vibrations.

Exigences de conception pour la masse de réaction en alliage de tungstène

La masse de réaction d'un alliage de tungstène dépend de la précision de sa conception structurelle et de la stabilité de ses propriétés. Les principales exigences de conception sont les suivantes :

- **Sélection de matériaux haute densité et haute résistance** :
L'alliage de tungstène présente une densité allant jusqu'à $18,5 \text{ g/cm}^3$, bien supérieure à celle de matériaux métalliques tels que l'acier et le cuivre à volume égal, et permet d'obtenir une force de réaction maximale par unité d'espace. Sa résistance élevée à la traction et à la compression garantit qu'il ne se déformera ni ne se cassera sous une charge dynamique élevée.
- **La conception précise de la masse et de la position**
dépend de l'adéquation précise à la fréquence cible. La masse, la position de distribution et l'angle d'installation du bloc en alliage de tungstène doivent être soigneusement calculés sur la base de l'analyse modale de la structure de l'avion et de la simulation dynamique afin d'éviter toute inadéquation de fréquence ou résonance couplée.
- **Stabilité environnementale et durée de vie**
L'alliage de tungstène présente une résistance à la corrosion, une résistance aux radiations et une stabilité thermique extrêmement fortes, et convient au fonctionnement à long terme dans la couche limite atmosphérique, à haute altitude et à basse température ou en orbite terrestre basse, garantissant que les performances du contrepoids ne diminuent pas en raison de l'oxydation et de la fatigue.

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

- **Ajustabilité et structure modulaire**

Dans les missions changeantes et les scénarios de contrôle de vol complexes, la conception de modules de contrepoids en alliage de tungstène avec des structures réglables peut réaliser un réglage rapide sur site en modifiant la position ou le nombre de blocs de masse, améliorant ainsi la maintenance et l'adaptabilité.

5.4.4 Exemples d'application

La masse de réaction de l'alliage de tungstène a été vérifiée sur plusieurs plateformes aéronautiques. Les principaux scénarios d'application comprennent :

- **Contrôle des vibrations des turbomachines.**

Dans un certain type de turbomachine militaire, le bloc de réaction en alliage de tungstène est disposé au bord du disque d'aube et derrière l'arbre principal. La force d'inertie interfère avec le déséquilibre rotationnel de la structure principale pour supprimer les vibrations structurelles d'une fréquence spécifique. Les données mesurées montrent que l'amplitude des aubes est réduite d'environ 40 % et la durée de vie du moteur est augmentée de plus de 20 %.

- **Stabilisation d'attitude et réduction des vibrations du système de contrôle d'attitude des satellites.**

Sur les petites plateformes de communication par satellite, des roues de réaction en alliage de tungstène sont intégrées au système de contrôle d'attitude du satellite afin de générer un moment angulaire contrôlable. Parallèlement, la structure interne de réduction des vibrations amortit les micro-vibrations provoquées par le démarrage de la roue de réaction, réduisant ainsi efficacement les erreurs de réglage d'attitude et améliorant la précision des observations et des communications.

- **Suppression des vibrations pendant le vol du missile.**

Un certain type de missile lancé par voie aérienne subit d'intenses vibrations dues au vol supersonique, et les premières versions présentent des problèmes d'instabilité en lacet terminal. En plaçant un bloc de masse de réaction en alliage de tungstène au centre du corps du missile et en le combinant avec des matériaux d'amortissement viscoélastiques, les vibrations verticales et radiales sont considérablement supprimées, et la précision de frappe est améliorée de 12 %.

- **Lors du test en vol à nombre de Mach élevé du système de suppression des vibrations de l'avion de vérification hypersonique, le bloc de masse de réaction en alliage de tungstène coopère avec le capteur embarqué pour obtenir un réglage de la réponse aux vibrations en temps réel,**

offrant un environnement à faible bruit pour la collecte de données de contrôle de vol.

5.4.5 Tendances de développement futures

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

À mesure que les structures aéronautiques évoluent vers plus de légèreté, d'épaisseur et d'intégration, les exigences de fiabilité et de stabilité ne cessent de croître. La technologie des blocs de masses de réaction en alliage de tungstène est également confrontée à de nouveaux défis et opportunités :

- **Le système intelligent de réduction des vibrations**
peut être intégré à des microcapteurs et à des unités de contrôle MEMS. Associé au système de commandes de vol, il peut identifier de manière autonome l'état vibratoire et ajuster la fréquence de réponse en temps réel pour créer un « contrepoids intelligent ».
- **de structures complexes en alliage de tungstène par impression 3D**
permet de transformer l'alliage de tungstène en structures creuses, en coques de forme spéciale ou en nouveaux contrepoids avec canaux de conduction thermique intégrés, améliorant encore la densité fonctionnelle.
- **La conception collaborative d'une structure composite légère et d'un alliage de tungstène**
intègre l'alliage de tungstène dans des matériaux composites en fibre de carbone, un nid d'abeille en aluminium et d'autres structures pour former un module de réduction des vibrations combiné léger et haute densité, qui prend en compte à la fois la résistance structurelle et l'effet de contrepoids.
- **La recherche et le développement de blocs de réaction à couplage électromagnétique**
sont destinés à certaines plateformes de navigation et de communication spatiale. Des blocs de réaction composites à base de tungstène, dotés d'une fonction d'absorption électromagnétique, sont développés pour combiner les fonctions de contrôle dynamique et de protection contre les interférences électromagnétiques.

5.5 Poids inertiels en alliage de tungstène dans les systèmes d'armes de défense

5.5.1 Exigences de contrôle inertiel pour les systèmes d'armes de défense

Avec l'évolution rapide de l'information et de la guerre intelligente, les systèmes d'armes modernes imposent des exigences sans précédent en matière de précision de guidage, de rapidité de réaction aux frappes et d'adaptabilité environnementale. Missiles, bombes intelligentes, drones et avions hypersoniques s'appuient de plus en plus sur les systèmes de navigation inertielle (INS) pour assurer un positionnement, une planification de trajectoire et un contrôle de vol autonomes.

Les composants clés du système de navigation inertielle comprennent des accéléromètres, des gyroscopes et des unités de mesure inertielle (IMU). La stabilité de son fonctionnement dépend fortement de la position et de la précision massique des composants de référence inertielle (tels que les roues inertielles et les contrepoids). Afin de maintenir la stabilité du système dans des conditions de combat à grande vitesse, hautement dynamiques et complexes, la conception structurelle, la répartition des masses et le choix des matériaux du contrepoids inertiel deviennent des facteurs clés pour déterminer les performances de guidage et de contrôle du système d'arme.

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

Dans ce contexte, l'alliage de tungstène est largement utilisé dans les systèmes de contrepoids inertiels des armes et des équipements en raison de sa densité extrêmement élevée, de sa résistance mécanique et de sa stabilité thermique. C'est le matériau de base pour garantir le fonctionnement efficace et durable des systèmes de navigation inertielle.

5.5.2 Avantages de l'alliage de tungstène dans le poids inertiel de défense

L'alliage de tungstène est devenu le matériau de référence pour la masse d'inertie des équipements de défense nationale grâce à ses propriétés physiques et chimiques uniques. Il présente les avantages exceptionnels suivants :

- **Haute densité permettant d'obtenir des contrepoids compacts et de haute qualité.**

La densité de l'alliage de tungstène peut atteindre 17,0 à 18,5 g/cm³, soit une densité bien supérieure à celle de l'acier (environ 7,8 g/cm³) et de l'aluminium (environ 2,7 g/cm³). Il permet d'obtenir des charges inertielles de haute qualité dans un volume très réduit et est particulièrement adapté aux petites munitions et aux plateformes de micro-vol disposant d'un espace extrêmement restreint.

- **Excellente adaptabilité environnementale.**

L'alliage de tungstène présente une excellente résistance aux hautes températures, à l'oxydation et à la corrosion. Il peut fonctionner de manière stable et durable dans des conditions de températures extrêmes (-50 °C à +1 000 °C), d'humidité élevée, de brouillard salin, de radiations et autres environnements courants sur le champ de bataille.

- **Résistance mécanique élevée et résistance aux chocs**

L'alliage de tungstène a une bonne résistance à la traction et aux chocs, et peut résister aux vibrations sévères et aux chocs de charge générés pendant le vol à grande vitesse, les chocs de lancement et les fluctuations d'explosion.

- **L'adaptabilité du traitement et la flexibilité de la conception structurelle**

peuvent atteindre un contrôle de forme au niveau du micron grâce à la métallurgie des poudres de précision, à la découpe CNC, à l'usinage par électro-étincelle, etc., pour répondre aux exigences de structure géométrique complexe des composants inertiels, et peuvent être conçus en composants de sous-systèmes inertiels modulaires et intégrés.

5.5.3 Domaines d'application spécifiques

L'alliage de tungstène est largement utilisé dans le domaine du poids inertiel de la défense, couvrant de nombreux systèmes de combat clés :

- **Ensemble de poids du noyau du système de navigation inertielle (INS)**

L'alliage de tungstène est utilisé comme masse de référence du système de navigation inertielle. Il augmente le moment d'inertie du gyroscope ou de la roue inertielle afin d'améliorer la sensibilité et la stabilité de la réponse du système. En particulier dans les gyroscopes laser et à fibre optique, les blocs de masse en alliage de tungstène sont utilisés pour ajuster la stabilité du trajet optique et la précision de la solution de vitesse angulaire.

- **Système de contrôle de vol de munitions guidées de précision**

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

Dans les missiles balistiques, les missiles de croisière et autres aéronefs, les contrepoids en alliage de tungstène sont largement utilisés dans le compartiment des commandes de vol pour ajuster précisément le centre de gravité de la gouverne, optimiser le contrôle aérodynamique et améliorer la réactivité en attitude, assurant ainsi un contrôle stable en boucle fermée du système de commandes de vol. Des modèles classiques tels que le missile de croisière « Tomahawk » et la série de missiles de défense aérienne « Hongqi » utilisent tous des contrepoids en alliage de tungstène comme composants de réglage des commandes de vol.

- **Module de contrôle d'attitude et de réglage du centre de gravité du drone**

Pour les plateformes tactiques ou les micro-drones, la stabilité d'attitude en vol est cruciale. Des masselottes d'inertie en alliage de tungstène sont installées au centre de commande de vol ou au pied de l'hélice afin d'améliorer la sensibilité du retour d'attitude et de permettre un ajustement du centre de gravité en temps réel pendant le vol grâce à des structures mécaniques ou électromagnétiques, améliorant ainsi la résistance au vent et l'endurance.

- **Poids inertiels pour obus d'artillerie et bombes intelligentes**

Les obus d'artillerie modernes, les bombes planantes et autres munitions guidées s'appuient sur des éléments inertiels pour corriger leur trajectoire. De petits contrepoids en alliage de tungstène sont devenus indispensables au module inertiel pour assurer la stabilité rotationnelle et l'équilibre dynamique.

5.5.4 Tendances de développement futures

Avec le développement rapide de systèmes d'armes intelligents, intégrés et miniaturisés, la technologie des masses inertielles en alliage de tungstène présente également les tendances suivantes :

- **Miniaturisation et développement à haute intégration.**

Les futures plateformes d'armes, telles que les drones en essaim et les modules de microguidage embarqués sur missiles, nécessiteront une miniaturisation des contrepoids inertiels. Matériau à ultra-haute densité, l'alliage de tungstène conserve d'excellentes performances de contrepoids à l'échelle millimétrique et deviendra un composant important des micro-avions et des modules inertiels MEMS.

- **Conçu comme un système intégré, le capteur**

sera emballé avec des composants de base tels que le capteur d'attitude et le gyroscope pour atteindre un degré élevé d'intégration structurelle et améliorer l'anti-interférence et la fiabilité du système.

- **Le système de contrepoids inertiel réglable intelligent**

réalise un réglage dynamique de la masse du contrepoids inertiel en intégrant des matériaux piézoélectriques ou une structure de bloc de masse variable, qui peuvent s'adapter aux exigences de contrôle en temps réel pendant le vol et améliorer la vitesse de réponse et la flexibilité du système de contrôle de vol.

- **Un nouveau matériau composite en alliage de tungstène développe**

et étudie des matériaux composites à base de tungstène, tels que les composites tungstène-polymère et les matériaux tungstène-céramique, pour garantir qu'ils ont une usinabilité et

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

une compatibilité électromagnétique plus fortes tout en garantissant une densité élevée, et pour répondre aux exigences des futures plates-formes de combat multifonctionnelles.

Les contrepoids en alliage de tungstène offrent un large éventail d'applications critiques dans le secteur aérospatial grâce à leur densité élevée, leur résistance élevée et leur excellente adaptabilité environnementale. Du réglage du centre de gravité des avions à la commande inertielle des satellites, en passant par les contrepoids de queue de fusée et la suppression des vibrations, jusqu'aux contrepoids inertiels des systèmes d'armes de défense nationale, la valeur des alliages de tungstène est irremplaçable. Grâce aux progrès technologiques, la conception et la fabrication de ces contrepoids continueront de s'améliorer, propulsant les équipements aérospatiaux vers des performances et une intelligence accrues.

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

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

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

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/cm³), 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

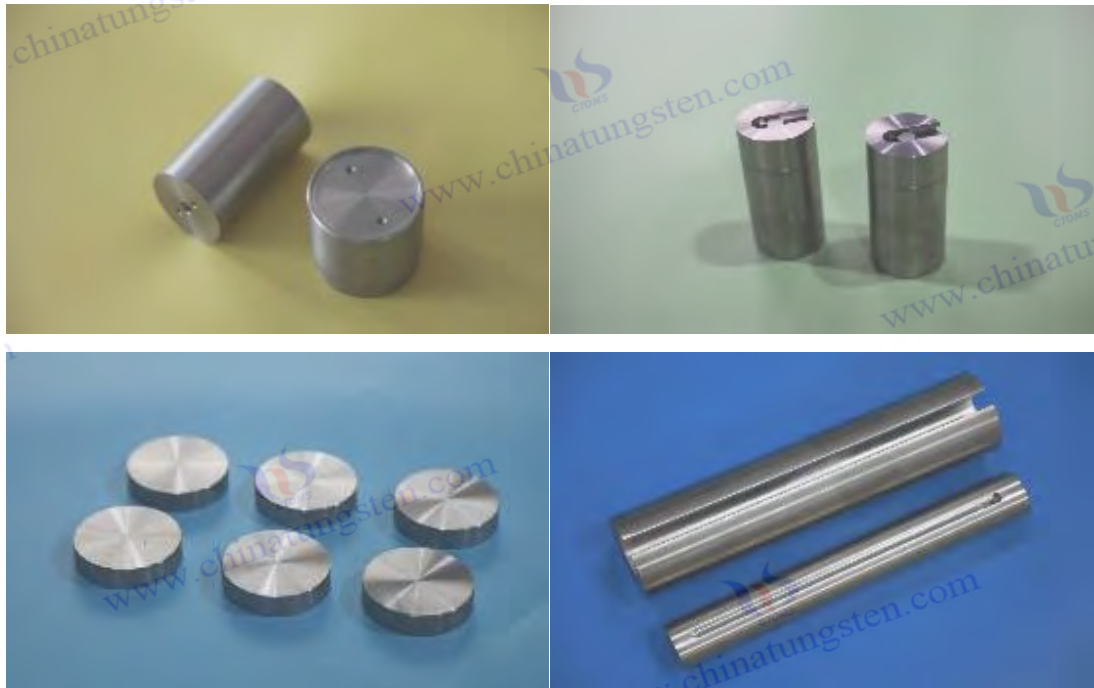
1 billion+ visits to the official website, 1 million+ web pages, 100,000+ customers, 0 complaints in 30 years!

Contact us

Email: sales@chinatungsten.com

Tel: +86 592 5129696

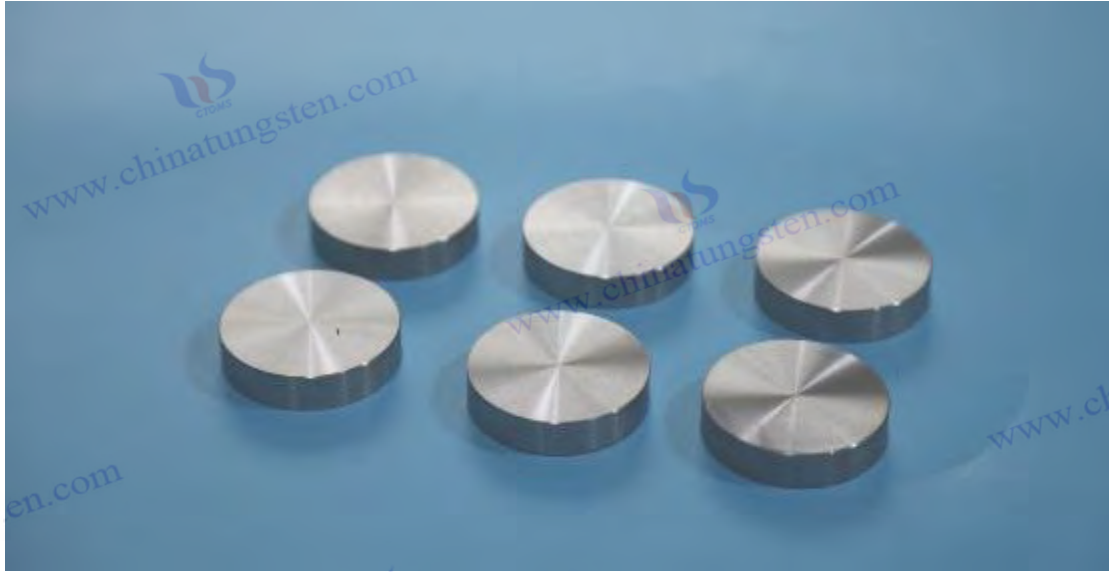
Official website: www.tungsten-alloy.com



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

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



Chapitre 6 Application des contrepoids en alliage de tungstène dans les automobiles et les machines d'ingénierie

L'alliage de tungstène est devenu un matériau important dans la conception de contrepoids dans les secteurs de l'automobile et des machines d'ingénierie grâce à sa densité élevée, sa grande résistance et son excellente résistance à l'usure et à la corrosion. Une conception judicieuse des contrepoids améliore non seulement la stabilité, l'efficacité de la transmission de puissance et la sécurité des véhicules ou des machines, mais optimise également considérablement le contrôle et les performances mécaniques. Avec la tendance croissante à la légèreté et aux performances élevées des automobiles, et le développement de machines d'ingénierie intelligentes et à grande échelle, la valeur des contrepoids en alliage de tungstène ne cesse de croître. Ce chapitre détaille les applications et le développement technique des contrepoids en alliage de tungstène pour l'équilibrage dynamique des moteurs et châssis automobiles, l'optimisation des contrepoids de course de Formule 1, les modules de contrepoids pour trains à grande vitesse, les contrepoids pour grues et machines blindées, et les contrepoids stables pour les engins de chantier de grande envergure.

6.1 Équilibrage dynamique du poids entre le moteur et le châssis de l'automobile

L'alliage de tungstène joue un rôle essentiel dans le système de propulsion et la structure du châssis des automobiles modernes, notamment pour améliorer l'équilibre dynamique des systèmes mécaniques, supprimer les vibrations et améliorer la stabilité et le confort de l'ensemble du véhicule. Cette section explique en détail l'application des contrepoids en alliage de tungstène dans les moteurs et les châssis automobiles, en abordant le contexte technique, les avantages des matériaux, les méthodes de conception, les cas typiques et les perspectives de développement.

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

6.1.1 Contexte technique du contrepoids de moteur automobile

En tant que cœur de la voiture, le moteur est composé de multiples pièces rotatives et alternatives à grande vitesse, telles que le vilebrequin, le volant d'inertie, le système piston-bielle, etc. Ces pièces génèrent une force centrifuge et un impact d'inertie importants pendant le fonctionnement, en raison d'une masse inégale ou d'une déviation de la structure mécanique. Sans contrôle, cela peut facilement entraîner :

- Les vibrations de l'ensemble du véhicule s'intensifient et le confort de conduite diminue ;
- La fatigue des pièces augmente, provoquant une usure prématurée ou une casse ;
- Le rendement énergétique diminue et la consommation d'énergie du moteur augmente.

À cette fin, les conceptions de moteurs modernes introduisent généralement **des systèmes de contrepoids dynamiques**, qui équilibrent les irrégularités dynamiques du système de rotor en ajoutant de petits contrepoids à haute densité aux pièces mobiles clés pour obtenir un fonctionnement stable à des vitesses élevées.

Les matériaux de contrepoids traditionnels, tels que la fonte ou l'acier, ne répondent plus aux exigences de légèreté et de performances élevées de la nouvelle génération d'automobiles en termes de densité, de volume et de stabilité thermique. Par conséquent, **l'alliage de tungstène, grâce à ses excellentes propriétés physiques et mécaniques, a progressivement remplacé les matériaux traditionnels et est devenu la solution de contrepoids privilégiée.**

6.1.2 Avantages des contrepoids en alliage de tungstène dans les moteurs

L'alliage de tungstène dans les contrepoids de moteurs automobiles se reflète principalement dans les aspects suivants :

- **La haute densité permet d'obtenir des contrepoids compacts et de haute qualité.**
La densité de l'alliage de tungstène atteint 17,0-18,5 g/cm³, soit près du double de celle de l'acier. À masse égale, il occupe moins d'espace, ce qui permet un positionnement précis des contrepoids dans les zones à espace restreint (comme les vilebrequins ou les extrémités de rotor), améliorant ainsi la précision de l'équilibrage dynamique et favorisant la compacité des moteurs.
- **Excellentes performances à haute température.**
Les moteurs essence ou diesel sont soumis à des températures de combustion élevées toute l'année. Le point de fusion de l'alliage de tungstène atteint 3 410 °C. Même en fonctionnant longtemps à une température de fonctionnement comprise entre 250 et 500 °C, le moteur conserve sa forme et ses propriétés mécaniques stables.
- **Résistance à la corrosion et à l'usure :**
l'alliage de tungstène offre une excellente résistance à la corrosion chimique et peut être utilisé durablement dans un environnement contenant de l'huile, des sous-produits de

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

combustion, voire des résidus acides et alcalins. Sa dureté élevée le rend également moins sujet à l'usure par frottement prolongé, réduisant ainsi la fréquence d'entretien.

- **L'alliage de tungstène haute densité avec une forte capacité de suppression des vibrations**

présente d'excellentes caractéristiques de réponse inertielle, qui peuvent absorber efficacement les micro-vibrations à haute fréquence, réduire le bruit et l'impact déséquilibré de l'ensemble de la machine, et constitue un matériau clé pour l'ingénierie NVH (bruit, vibrations et confort acoustique) du moteur.

6.1.3 Points clés de la conception d'un contrepoids dynamique

La répartition dynamique du poids dans les moteurs et les châssis automobiles nécessite l'optimisation de plusieurs composants clés. Les solutions de conception courantes incluent :

- **Conception des contrepoids de vilebrequin.**

Une rotation déséquilibrée du vilebrequin provoque de fortes vibrations. Les contrepoids en alliage de tungstène sont généralement intégrés avec précision aux deux extrémités ou à la taille du vilebrequin par forgeage ou frittage, et compensent le décalage de masse grâce à un réglage tridimensionnel du centre de gravité. Comparés à l'acier, les contrepoids en tungstène sont compacts et flexibles, permettant une compensation d'inertie inférieure au gramme.

- **Le volant d'inertie**

doit également contrôler avec précision l'inertie de rotation du moteur. La conception intégrée du contrepoids et du volant en alliage de tungstène permet un réglage précis de l'inertie et un contrôle du temps de réponse en modifiant la profondeur d'encastrement et la répartition annulaire.

- **Poids d'équilibrage dynamique du système de suspension du moteur Pour les véhicules équipés de petits moteurs à trois cylindres ou de systèmes d'entraînement électriques,**

des micro-poids d'équilibrage en alliage de tungstène sont également utilisés dans la structure de suspension du moteur pour ajuster la fréquence de résonance globale du système et empêcher la propagation des vibrations au ralenti à la carrosserie du véhicule.

- **Contrepoids de châssis et bloc stabilisateur de suspension**

Dans la structure du châssis du véhicule, comme le sous-châssis, le sommet de la tour d'amortisseur ou le mécanisme de direction, en installant un bloc d'équilibrage en alliage de tungstène, le réglage du centre de gravité du véhicule et l'optimisation de la stabilité latérale peuvent être obtenus, ce qui est particulièrement adapté aux véhicules ayant des exigences élevées en matière de conduite à grande vitesse et de stabilité dans les virages.

6.1.4 Cas d'application typiques

- **Système d'équilibrage dynamique du poids pour moteurs de voitures de luxe**

Le moteur V8 turbocompressé d'une marque automobile haut de gamme utilise un bloc

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

d'équilibrage de vilebrequin en alliage de tungstène personnalisé, combiné à une technologie de soudage au laser pour obtenir un équilibre dynamique ultime, permettant au moteur de fonctionner de manière stable au-dessus de 7 500 tr/min, tout en améliorant considérablement la douceur et le silence de conduite.

- **Système d'entraînement électrique pour véhicules à énergie nouvelle** Le système d'entraînement électrique des véhicules électriques à énergie nouvelle (tels que les moteurs synchrones à aimants permanents) a des exigences plus élevées en matière d'équilibre dynamique du rotor. Une entreprise a installé

des inserts en alliage de tungstène à l'intérieur du moteur d'entraînement, combinés à une rétroaction de surveillance dynamique, pour obtenir un réglage de l'inertie au niveau du volant d'inertie, améliorer la réponse à l'accélération de 30 % et réduire la génération de chaleur du rotor.

- **Le module de réglage de l'inertie du moteur de course utilise une** bague d'équilibrage creuse en alliage de tungstène pour les voitures de course de Formule 1. En modifiant sa position relative, l'inertie du moteur est ajustée pour répondre aux besoins spécifiques des différentes pistes en termes de vitesse.

6.1.5 Tendances de développement futures

À mesure que l'électrification, l'intelligence et la modularisation des automobiles s'accroissent, le rôle des contrepoids en alliage de tungstène dans les moteurs et les châssis continuera d'évoluer :

- **Système intelligent d'équilibrage dynamique du poids** : Combinant des capteurs MEMS et des actionneurs électromagnétiques, un système d'équilibrage dynamique du poids en alliage de tungstène avec rétroaction en temps réel est construit, qui peut ajuster automatiquement le centre de gravité et l'inertie en fonction du régime moteur et des changements de charge pour obtenir une réduction active des vibrations et une optimisation de l'efficacité énergétique.
- **Conception intégrée légère et fonctionnelle** : intégrer un contrepoids en alliage de tungstène avec un blindage électromagnétique, un tampon thermique et d'autres fonctions pour réduire le nombre de pièces et améliorer la fiabilité du système.
- **Fabrication verte et utilisation de matériaux recyclés** : Développer une technologie de frittage d'alliages de tungstène à faible consommation d'énergie et explorer le recyclage des masses de moteur mises au rebut pour atteindre les objectifs d'économie circulaire et de neutralité carbone.

6.2 Conception optimisée de la répartition du poids d'une voiture de course F1

La F1 étant l'une des disciplines les plus exigeantes techniquement au monde, l'optimisation des performances dépend non seulement du système de propulsion et de la conception aérodynamique, mais aussi de la conception scientifique et de l'agencement du **système de poids du véhicule**. L'alliage de tungstène, avec sa densité extrêmement élevée et ses propriétés physiques stables, est

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

devenu un matériau idéal pour les équipes de F1 pour l'ajustement de l'équilibre dynamique, l'optimisation du centre de gravité et le réglage précis de l'adaptabilité de la piste.

6.2.1 Importance du poids en F1

En F1, chaque gramme de répartition du poids peut déterminer la victoire ou la défaite. Selon la réglementation FIA, la masse totale minimale de la F1 2024 est de 798 kg (pilote compris), ce qui implique que l'équipe de conception doit procéder à des ajustements extrêmes du **centre de gravité, de la hauteur, de l'équilibre gauche-droite et de l'inertie dynamique de la carrosserie, dans le cadre de restrictions de poids strictes**.

Le contrepoids n'est pas seulement utilisé pour combler l'excédent dans la structure du véhicule, mais doit également se coordonner avec précision avec les conditions de travail des **composants aérodynamiques, du système de suspension et du système de freinage** pour atteindre les objectifs suivants :

- **Optimiser les performances en virage** : une répartition précise du poids à l'avant et à l'arrière peut améliorer la réponse de la direction et réduire le sous-virage ou le survirage ;
- **Améliorer l'efficacité du freinage** : la répartition du poids affecte la pression au sol des pneus, affectant ainsi les performances de freinage ;
- **Amélioration de l'accélération et de la traction dans les virages** : Le déplacement du centre de gravité vers l'arrière contribue à améliorer la traction des roues motrices ;
- **Amélioration de la cohérence de la tenue de route du véhicule** : le réglage du poids peut améliorer la confiance du conducteur et son sentiment de contrôle sur le véhicule, en particulier dans des conditions de piste glissantes, cahoteuses ou à température variable.

6.2.2 Avantages des contrepoids en alliage de tungstène en F1

La structure de la carrosserie des F1 est extrêmement compacte. Les matériaux traditionnels comme l'acier et l'aluminium ne permettent pas d'assurer la masse requise dans un espace restreint. L'alliage de tungstène est devenu le matériau de choix pour les contrepoids haut de gamme en raison de ses excellentes performances.

- **Forte concentration massique :**
La densité de l'alliage de tungstène atteint 18,5 g/cm³, soit plus de 2,3 fois celle de l'acier. À masse égale, le volume du contrepoids est nettement plus réduit, ce qui permet aux concepteurs de le placer dans des espaces extrêmement étroits, comme au centre du plancher, derrière le passage de roue ou dans un angle mort de la carrosserie, pour une répartition précise des masses.
- **Excellente stabilité thermique et structurelle.**
En F1, la température des disques de frein peut atteindre 1 000 °C, et la différence de température à l'intérieur de la carrosserie peut dépasser 50 °C. L'alliage de tungstène présente une bonne inertie thermique et une bonne stabilité dimensionnelle. Il résiste

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

durablement aux chocs thermiques sans dilatation, déformation ni fatigue, garantissant ainsi la stabilité à long terme de l'effet de poids.

- **Usinabilité élevée et flexibilité de personnalisation :**

l'alliage de tungstène permet de réaliser des formes géométriques complexes grâce à l'usinage CNC de précision, l'électroérosion par étincelles et le moulage par injection MIM, entre autres, pour s'adapter à la structure des différentes pièces de la carrosserie. Il présente une grande résistance mécanique et une bonne résistance à l'usure, et peut être combiné avec des matériaux F1 courants tels que la fibre de carbone et l'alliage de titane pour une intégration et une fiabilité accrues.

6.2.3 Stratégie d'optimisation de la répartition du poids

Les contrepoids en alliage de tungstène ne servent pas uniquement à combler les lacunes des voitures de course. Leur conception est elle-même un processus d'ingénierie système extrêmement complexe, nécessitant souvent une optimisation à double voie : simulation et mesures réelles.

- **de répartition du poids**

est d'environ 40:60, mais ce rapport spécifique peut être ajusté avec souplesse en fonction des caractéristiques du circuit (comme de nombreuses épingles à cheveux ou de longues lignes droites). La petite taille et la haute qualité des alliages de tungstène permettent aux concepteurs d'affiner la répartition du poids au sein de la structure du nez avant ou de l'aile arrière afin d'améliorer la stabilité directionnelle du véhicule au freinage et sa capacité d'accélération en sortie de virage.

- **Réglage du poids latéral.**

Les masses gauche et droite jouent un rôle déterminant dans la répartition latérale de la charge du véhicule en virage. Sur les circuits urbains comme Monaco et l'étroit circuit de Silverstone, une différence de poids latérale raisonnable peut améliorer considérablement la réactivité en virage et réduire la dérive de la direction.

- **Plus le centre de gravité est bas, plus la voiture est stable.**

Des blocs en alliage de tungstène sont souvent installés aux points les plus bas de la carrosserie (comme à l'avant et à l'arrière du châssis, sous la batterie), afin de renforcer l'appui aérodynamique à grande vitesse et de maintenir un contact absolu avec le sol lors des accélérations en descente ou des changements de voie à grande vitesse.

6.2.4 Conception et fabrication réelles

- Tous les contrepoids en alliage de tungstène sont usinés par des machines-outils CNC à cinq axes avec une précision de contrôle supérieure à $\pm 5 \mu\text{m}$, garantissant une erreur de poids de chaque pièce inférieure à 0,05 %. Après fabrication, les dimensions et la qualité sont vérifiées par le système de mesure tridimensionnelle CMM.

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

- La liaison entre le contrepoids et le châssis de **la structure intégrée fixe doit être légère et très résistante. Elle est généralement assurée par des trous filetés en alliage de titane et des supports en fibre de carbone imbriqués. Certaines équipes utilisent même des systèmes de serrage imprimés en 3D pour un assemblage efficace et un remplacement rapide sans soudure.**
- **Système d'ajustement dynamique basé sur les données :**
chaque voiture de F1 est équipée d'un grand nombre de capteurs pour collecter des données telles que l'accélération longitudinale, la charge latérale, la température des pneus et le contact au sol. Les ingénieurs utilisent des analyses de simulation (telles que l'analyse par éléments finis FEA + la dynamique multi-corps MBD) pour personnaliser les solutions de poids en tungstène pour différents circuits avant la course, et peuvent également s'adapter rapidement entre les qualifications et la course.

6.2.5 Analyse de cas

- **Une équipe de F1 de premier plan a introduit un nouveau**
module de masse centralisé en alliage de tungstène (situé sur le plancher arrière) sur le circuit de Monza, en Italie. Par rapport au module traditionnel, le volume est réduit en moyenne de 18 % et le centre de gravité est reculé de 2,5 mm sans augmenter la masse totale. Au final, cela permet d'augmenter la vitesse du véhicule en virage de 1,3 km/h et de raccourcir le temps de passage en virage de 0,21 seconde.
- **du Grand Prix de Monaco 2023, une autre équipe a spécialement personnalisé un « bloc anti-roulis » en alliage de tungstène pour la conception du drainage des eaux de pluie sur le côté gauche du véhicule, afin que le véhicule puisse maintenir la stabilité directionnelle dans**
les virages à faible adhérence, réduire considérablement le nombre de glissades de la queue et enfin gagner une place dans la zone de points.

6.3 Module de contrepoids pour train à grande vitesse et train à grande vitesse

Le transport ferroviaire moderne exigeant des exigences accrues en matière de vitesse, de confort et de sécurité, la conception structurelle des trains à grande vitesse devient de plus en plus complexe et sophistiquée. Dans un contexte de structure de caisse hautement intégrée, de poids limité et de conditions d'exploitation variables, la disposition judicieuse de **modules de contrepoids hautes performances** est devenue un élément indispensable de la conception technique des trains.

L'alliage de tungstène remplace progressivement les matériaux traditionnels tels que l'acier et le plomb grâce à sa densité élevée, sa résistance élevée et son excellente durabilité. Il est utilisé dans les trains à grande vitesse pour **le contrôle du centre de gravité, la réduction des vibrations sous charge dynamique et la maîtrise du bruit**. Sa valeur technique ne cesse de croître.

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

6.3.1 Contexte technologique des contrepoids pour trains à grande vitesse

Lorsqu'ils roulent à une vitesse de 300 à 400 km/h, les trains à grande vitesse sont confrontés à des conditions physiques complexes telles que de fortes **charges vibratoires, la force centrifuge, des perturbations de la résistance au vent, des chocs de freinage**, etc. La réponse dynamique de la carrosserie est encore plus intense lors des virages, des accélérations ou des décélérations, ou lors du passage à travers des sections hétérogènes telles que des ponts et des tunnels.

Mécanismes de réglage du centre de gravité et de contrôle des vibrations dès les premières phases de conception. Le module de contrepoids, composant d'équilibrage dynamique et de suppression des vibrations au niveau du système, assure principalement les tâches suivantes :

- **Corriger le centre de gravité du véhicule et du chariot**, et optimiser la répartition de la charge sur l'essieu des roues ;
- **Ajustez le degré de correspondance de la fréquence de vibration des composants** pour éviter la résonance et la fatigue structurelle ;
- **Améliorer le confort de conduite et les niveaux de bruit**, et améliorer la qualité des opérations commerciales ;
- **Prend en charge le système de suspension pour obtenir une réponse dynamique précise** et réduire la complexité du système.

6.3.2 Avantages du module de contrepoids en alliage de tungstène

Dans l'industrie ferroviaire, le module de contrepoids doit être non seulement « lourd », mais aussi « stable ». Les alliages de tungstène présentent de nombreuses caractéristiques qui leur confèrent des avantages techniques irremplaçables dans les applications ferroviaires à grande vitesse :

- **haute densité et de haute qualité**
peuvent atteindre 18,0-18,5 g/cm³, soit plus du double de ceux de l'acier au carbone ordinaire. Dans le bas de la carrosserie ou la cavité de suspension, où l'espace est extrêmement limité, le contrepoids requis peut être obtenu dans un volume réduit, évitant ainsi de compromettre les autres configurations du système.
- **Excellente résistance mécanique et adaptabilité aux charges dynamiques.**
Le corps du train à grande vitesse est soumis à des millions de cycles de vibrations pendant son fonctionnement. L'alliage de tungstène présente une résistance à la traction élevée, un module de Young élevé et un taux de propagation des fissures de fatigue extrêmement faible, garantissant ainsi l'intégrité structurelle du module de contrepoids sous des charges haute fréquence prolongées.
- **Excellente résistance environnementale :**
Les lignes ferroviaires à grande vitesse chinoises traversent diverses zones climatiques, telles que les plateaux, les déserts et les zones côtières. L'alliage de tungstène offre une excellente résistance à l'humidité, à la chaleur, aux embruns salins et à la corrosion acide et alcaline, et peut fonctionner longtemps dans des conditions climatiques extrêmes sans rouiller ni se déformer.

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

- **Une bonne aptitude au traitement structurel**
peut réaliser une conception de structure complexe et de forme spéciale grâce à la métallurgie des poudres, au pressage isostatique à chaud, au traitement CNC et au formage par soudage, répondant aux besoins d'installation modulaire, de remplacement rapide et d'intégration précise des trains à grande vitesse.

6.3.3 Conception du module de contrepoids

Dans le système ferroviaire à grande vitesse, la disposition des contrepoids en alliage de tungstène doit être conçue en coordination avec la structure du véhicule, le système de contrôle électronique, le système de suspension et la stratégie de contrôle du bruit et des vibrations. Les principales orientations de conception comprennent :

- **Le contrepoids du châssis de la caisse**
est généralement installé sur un support structurel ou une cabine basse, près de l'axe central de la caisse. En ajustant avec précision les positions longitudinale et latérale du centre de gravité, il permet de contrôler la tendance du train à se renverser, à osciller et à vibrer à grande vitesse.
- **Le module de contrepoids du système de suspension**
peut être utilisé dans le système de suspension primaire ou secondaire pour réduire le taux de transmission des vibrations, améliorer la stabilité du véhicule et l'effet d'isolation des vibrations en ajustant la fréquence de résonance du système et en améliorant la réponse de l'amortisseur.
- **Les contrepoids de roue et de bogie sont équipés de**
blocs en alliage de tungstène à des positions spécifiques du système d'essieu de roue ou du bogie pour **l'équilibrage de l'inertie** et la suppression du bruit, en particulier dans les sections courbes ou les passages d'aiguillage, pour supprimer les vibrations latérales et les mouvements serpentins et prolonger la durée de vie du rail de roue.
- **La structure auxiliaire de contrepoids des équipements du véhicule**
assure un contrepoids local sur les équipements de grande masse, tels que les climatiseurs et les moteurs de traction, afin d'éviter les vibrations asymétriques. Elle assure également l'équilibrage de modules tels que les batteries embarquées et les boîtiers de commande électroniques, afin d'améliorer la stabilité CEM et de faciliter la maintenance.

6.3.4 Pratique d'application

Ces dernières années, les fabricants de trains à grande vitesse de nombreux pays ont commencé à introduire des systèmes de contrepoids en alliage de tungstène dans le processus de mise en service et d'optimisation des véhicules, et ont obtenu des résultats remarquables :

- **Cas 1 : Essais techniques du train à grande vitesse CR400AF.**
Un certain type d'EMU adopte un châssis en alliage de tungstène à module de masse centralisé. Par rapport à la solution traditionnelle en fonte, le volume structurel est réduit

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

de près de 50 %, tandis que l'indice de stabilité opérationnelle du train est amélioré de 11 % et le taux de réussite au test de stabilité au vent latéral est augmenté de 15 %.

- **Cas 2 : Un projet d'amélioration du confort des trains à grande vitesse en Europe a introduit**

des contrepoids modulaires en tungstène dans le système de suspension secondaire, ce qui a permis d'améliorer efficacement le problème de tremblement de la cabine. La valeur efficace de l'accélération du siège a diminué d'environ 0,08 m/s² et le score de satisfaction des passagers a augmenté de plus de 20 %.

6.3.5 Tendance de développement

Avec l'avancement des objectifs de « train à grande vitesse intelligent », de « train à grande vitesse vert » et de « pic de carbone et neutralité carbone », la conception des modules de contrepoids en alliage de tungstène évolue progressivement vers la numérisation, l'intelligence et la durabilité :

- À l'avenir, les blocs de contrepoids du **système de contrepoids réglable intelligent seront combinés avec des capteurs MEMS et des modules de déplacement électrique pour réaliser un ajustement de masse en temps réel et une migration du centre de gravité** à mesure que la charge du véhicule et la vitesse de fonctionnement changent, améliorant ainsi l'adaptabilité du système et le niveau d'économie d'énergie.
- **Le recyclage des matériaux et la fabrication verte** favorisent la **technologie métallurgique de recyclage et le système de recyclage des poudres d'** alliages de tungstène, réduisent la dépendance à l'égard de l'extraction des ressources en tungstène et réalisent l'utilisation en boucle fermée de matériaux de contrepoids haut de gamme.
- **La conception modulaire multifonctionnelle intégrée** combine les exigences fonctionnelles d'isolation thermique, d'absorption acoustique, de résistance au feu, de réduction des vibrations, etc., et intègre la structure du contrepoids en alliage de tungstène avec d'autres composants (tels que les chemins de câbles et les renforts structurels) pour améliorer le taux d'utilisation de l'espace et le niveau de simplification structurelle du train.

6.4 Grues, équipements de levage et contrepoids de machines blindées

Dans les grands travaux de génie civil et la construction d'infrastructures modernes, les engins de chantier lourds tels que les grues, les engins de levage et les machines à blindage assurent des tâches essentielles. Ces équipements présentent généralement des problèmes de décalage du centre de gravité, de vibrations structurelles et de déséquilibre de charge en fonctionnement. Une configuration inadaptée du système de contrepoids peut non seulement entraîner un fonctionnement mécanique instable et réduire l'efficacité de la construction, mais aussi provoquer des accidents. Les blocs de contrepoids en alliage de tungstène sont devenus un choix idéal pour les solutions de

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

contrepoids hautes performances dans ces équipements, grâce à leur densité élevée, leur résistance élevée et leur excellente stabilité structurelle.

6.4.1 Importance des contrepoids pour les engins de chantier

Lorsqu'un engin de chantier effectue des opérations telles que le levage, l'excavation, la rotation ou le transfert, son centre de gravité se déplace en fonction des variations de la structure et de la charge. Par exemple :

- Une fois que la grue a soulevé l'objet lourd, le centre de gravité global se déplace vers l'avant, ce qui est très susceptible de provoquer un risque de renversement ;
- Lors de l'avancement de la machine à bouclier, le centre de gravité doit être constamment ajusté pour maintenir l'équilibre des forces avant et arrière et assurer la direction de l'excavation ;
- Les gros équipements de levage doivent maintenir la stabilité de la plate-forme pivotante dans des conditions de charge asymétriques pour éviter le tassement des fondations ou les vibrations structurelles.

Par conséquent, la conception scientifique et rationnelle du système de contrepoids pour garantir que la machine a une stabilité suffisante dans diverses conditions de travail est une question d'ingénierie essentielle pour garantir la sécurité de la construction, la durée de vie de la machine et l'efficacité de fonctionnement.

6.4.2 Avantages d'application des contrepoids en alliage de tungstène

Comparé aux contrepoids traditionnels en acier ou en fonte, l'alliage de tungstène présente les avantages significatifs suivants, ce qui le rend plus adapté aux contrepoids hautes performances des machines d'ingénierie modernes :

- **La haute densité réduit le volume des contrepoids.**
La densité de l'alliage de tungstène atteint 18 g/cm^3 , soit bien plus que celle de l'acier ordinaire (environ $7,8 \text{ g/cm}^3$). Il permet d'obtenir une masse de contrepoids plus importante dans un espace restreint, de réduire considérablement le volume du module et de répondre aux exigences de conception de structures compactes.
- **Excellente résistance à l'usure et à la corrosion.**
Les équipements d'ingénierie sont souvent exposés à des environnements extrêmes tels que des températures élevées, une forte humidité, une forte concentration en sel, en acides, en alcalis, en sable et en poussière. L'alliage de tungstène présente une bonne stabilité chimique et une bonne résistance à l'usure, ce qui garantit sa durabilité et réduit la fréquence de remplacement.
- **Forte résistance aux chocs.**
L'alliage de tungstène présente un module de Young élevé et une limite d'élasticité élevée. Face aux charges soudaines d'objets lourds, aux résonances des fondations et aux collisions

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

violentes d'engins de chantier, il conserve une faible déformation et une grande stabilité, amortissant efficacement les chocs.

- **Matériaux alternatifs non toxiques et respectueux de l'environnement.**

L'utilisation du plomb dans les contrepoids traditionnels présente des risques de toxicité et de pollution environnementale. L'alliage de tungstène est un métal vert, non toxique et recyclable, qui répond aux exigences de conformité des projets d'ingénierie actuels en matière de réglementation environnementale.

6.4.3 Principes de conception des contrepoids

La conception du contrepoids des engins de construction doit être personnalisée et optimisée en fonction de la structure de son équipement, de son mode de fonctionnement et de son scénario de travail, en suivant principalement les principes suivants :

- **L'équilibre mécanique est privilégié.**

Des contrepoids en alliage de tungstène doivent être disposés sur les structures clés où le centre de gravité varie significativement, comme le côté opposé de la flèche, l'arrière de la plateforme tournante ou la queue du bouclier. L'équilibre dynamique de la structure peut être obtenu en calculant le moment de gravité afin d'éviter tout risque de retournement.

- **Pour des raisons de sécurité,**

la méthode de connexion du contrepoids doit adopter **un système de fixation mécanique à haute résistance**, tel qu'une combinaison de boulons + goupilles de positionnement + fentes de limite, et une structure anti-desserrage doit être conçue pour empêcher le contrepoids de se desserrer ou de tomber pendant les vibrations de l'équipement.

- **Maintenance aisée :**

la conception modulaire permet un remplacement et un réglage rapides du contrepoids, facilitant ainsi son déploiement dans des conditions de chantier changeantes. Certains équipements sont également équipés d'un rail de guidage ou d'une glissière pour une installation plus efficace du contrepoids.

- **La tendance future de l'intégration structurelle exige que**

les contrepoids en alliage de tungstène aient non seulement pour fonction de supporter des poids, mais puissent également être intégrés à des structures d'équipement telles que des poutres de support et des plaques de renfort pour améliorer la rigidité structurelle globale et simplifier le processus d'installation.

6.4.4 Exemples d'application spécifiques

Voici des exemples d'application typiques de contrepoids en alliage de tungstène dans les engins de construction :

- **Le contrepoids de grue à tour est équipé d'un**

module en alliage de tungstène à la base de la grue ou à l'arrière de la plateforme pivotante, ce qui améliore efficacement la capacité de support de la force de réaction de la charge frontale pendant le levage. L'espace de levage étant limité, notamment dans la construction

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

d'immeubles de grande hauteur en ville, la haute densité de l'alliage de tungstène résout le problème du volume excessif des contrepoids traditionnels.

- Dans les **gros équipements de levage, tels que les grues à roues et les grues sur chenilles, des contrepoids en alliage de tungstène peuvent être placés sous le châssis pivotant** ou la flèche pour supprimer le déplacement du centre de gravité causé par l'extension de la flèche pendant le processus de levage et améliorer la marge de sécurité de l'opération de levage.
- Les blocs en alliage de tungstène du **système de contrepoids de la machine à bouclier sont installés des deux côtés de la queue de la machine à bouclier et derrière le système d'entraînement principal pour compenser le centre de gravité avant de la** tête de coupe pendant l'avancement, maintenir la stabilité de la posture de la machine pendant l'excavation et réduire les interférences de lacet et de voie.
- **Système de contrepoids relevable pour grue sur chenilles**
Certaines grues sur chenilles haut de gamme sont équipées d'un véhicule à contrepoids mobile en alliage de tungstène, qui peut ajuster la position du contrepoids via une liaison pour s'adapter aux exigences de changement du centre de gravité en temps réel lorsque la flèche change.

6.4.5 Tendances de développement de l'industrie

À mesure que les équipements de levage et de protection évoluent vers **un tonnage plus important, un cycle de fonctionnement plus long et des conditions de travail plus complexes**, le système de contrepoids en alliage de tungstène présentera les tendances d'évolution technique suivantes :

- **Intégration structurelle et assemblage efficace :**
les contrepoids en alliage de tungstène seront mieux intégrés à la structure principale de l'équipement afin de réaliser une intégration « structure + fonction ». Par exemple, le bloc de contrepoids est intégré aux nervures de renfort à l'extrémité de la flèche afin de réduire le nombre de pièces soudées et d'améliorer la résistance structurelle.
- **Le système de surveillance intelligent et de réglage dynamique**
du contrepoids introduira **des modules de pesage intelligents, des capteurs inertiels, des encodeurs de position** et d'autres composants électroniques pour réaliser une surveillance du centre de gravité en temps réel et un retour d'information sur l'état du contrepoids, fournir un support de données pour le système de contrôle de l'équipement et aider au réglage automatique de la position du contrepoids.
- **Fabrication et recyclage écologiques.**
Dans le cadre des objectifs « double carbone », les fabricants d'engins de chantier accorderont une attention accrue à la recyclabilité et à la consommation d'énergie de fusion des matériaux de contrepoids. L'alliage de tungstène peut être réutilisé grâce à la technologie de recyclage et de refrittage, ce qui s'inscrit dans le futur modèle d'économie circulaire.
- **La conception du contrepoids composite multifonctionnel**
intègre le bloc de contrepoids avec des composants tels que le réservoir d'huile hydraulique,

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

le compartiment de batterie et l'unité de refroidissement pour améliorer la compacité de la structure du véhicule et le degré d'intégration fonctionnelle.

6.5 Schéma de contrepoids stable pour les engins de génie civil et les gros engins de chantier

Dans les grands projets de génie civil, tels que la construction d'infrastructures modernes, l'expansion urbaine et le développement minier, les engins de chantier lourds tels que les excavatrices, les bulldozers, les chargeuses et les engins de battage sont largement utilisés. Lorsque ces engins fonctionnent sous de fortes charges, leur stabilité, leur centre de gravité et leur capacité anti-renversement sont directement liés à l'efficacité de la construction et à la sécurité des travaux. Dans des conditions de travail complexes, comme les sols meubles, les pentes, les terrains irréguliers ou les conditions climatiques extrêmes, ces engins doivent présenter un excellent équilibre.

L'alliage de tungstène est devenu le matériau de base des systèmes de contrepoids modernes à hautes performances en raison de sa haute densité, de sa haute résistance et de son excellente adaptabilité environnementale, offrant une solution de contrepoids fiable et efficace pour les machines de génie civil.

6.5.1 Contexte technique des contrepoids pour les gros engins de chantier

Lorsque les engins de génie civil effectuent des tâches telles que saisir, pelleter, creuser et pousser, ils provoquent un déplacement important du centre de gravité. Par exemple :

- **Lorsque la pelle** est entièrement déployée, le centre de gravité de l'ensemble de la machine se déplace vers l'avant. Un contrepoids insuffisant peut facilement faire basculer l'arrière ou renverser la machine.
- Lorsque **le chargeur soulève le godet à pleine charge, le corps du chargeur se déplace longitudinalement, augmentant le risque de renversement ;**
- **le bulldozer** effectue des opérations de poussée à grande vitesse, il doit maintenir un centre de gravité bas pour éviter les glissements latéraux et les secousses.

Pour répondre aux exigences ci-dessus, l'équipement doit être équipé d'un système de contrepoids de qualité suffisante, d'une structure raisonnable et d'une fixation fiable. Les contrepoids traditionnels en acier ou en fonte présentent des défauts tels qu'un volume important, une disposition complexe et une densité insuffisante, ce qui les empêche de répondre aux exigences des engins de chantier modernes de grande envergure en termes de compacité et d'efficacité opérationnelle. L'alliage de tungstène s'est progressivement imposé comme le matériau de contrepoids haute performance de référence grâce à sa densité élevée de 18 g/cm³ et à sa masse plus importante pour un même volume.

6.5.2 Avantages des contrepoids en alliage de tungstène

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

L'alliage de tungstène dans le système de contrepoids des équipements de construction de génie civil se reflète dans les aspects suivants :

- **La haute densité permet un gain de place lors de l'installation.**

La densité de l'alliage de tungstène est environ 2,3 fois supérieure à celle de l'acier traditionnel, ce qui permet d'obtenir la masse de contrepoids requise dans un volume très réduit, idéal pour les zones arrière, inférieures ou de palier des équipements à faible encombrement.

- **Forte durabilité, adaptabilité aux conditions de travail difficiles.**

Les chantiers de construction civile sont souvent exposés à la poussière, à l'humidité, à la corrosion acide et alcaline, à une humidité et des températures élevées, ainsi qu'à d'autres environnements complexes. L'alliage de tungstène offre une excellente résistance à la corrosion et à l'usure, ce qui prolonge considérablement la durée de vie du contrepoids et réduit la fréquence de remplacement et d'entretien.

- **Excellente résistance aux chocs.**

Sous des charges dynamiques élevées, les équipements de construction sont soumis à des chocs et des vibrations fréquents. L'alliage de tungstène présente un module de Young et une limite d'élasticité élevés, ce qui lui permet de résister efficacement aux dommages dus à la fatigue et d'assurer la stabilité de la structure du contrepoids et sa fiabilité.

- **Non toxique et respectueux de l'environnement, il remplace les matériaux à base de plomb**

. Comparé à certains contrepoids traditionnels contenant du plomb, l'alliage de tungstène est non toxique et exempt de métaux lourds volatils. Il répond pleinement aux exigences des réglementations environnementales internationales telles que REACH et RoHS, et est largement utilisé dans les domaines des machines civiles et de l'ingénierie.

6.5.3 Conception du contrepoids

Les contrepoids en alliage de tungstène dans les équipements de construction à grande échelle nécessitent un plan d'aménagement modulaire scientifique et raisonnable basé sur la structure de l'équipement, la posture de travail et l'environnement de construction :

- **Un centre de gravité bas**

doit être installé autant que possible sur le châssis de l'équipement ou à l'arrière de la carrosserie afin de maintenir le centre de gravité de l'ensemble de la machine en position basse et d'améliorer sa capacité anti-renversement. Il est particulièrement adapté aux conditions de travail avec une forte poussée latérale, comme celles des bulldozers et des engins de battage.

- **Le**

bloc de contrepoids est conçu en plusieurs unités modulaires remplaçables et empilables. Les différents modules sont reliés par des boulons, des loquets ou des rails pour ajuster la masse et le centre de gravité du contrepoids selon les besoins. Il est facile à remplacer sur site et s'adapte à différentes tâches de construction.

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

- **Mesures de fixation de sécurité :**

Le bloc de contrepoids doit être fixé par une structure mécanique à haute résistance et équipé de dispositifs de protection tels que des écrous anti-desserrage, des joints antidérapants et des structures de limitation pour empêcher le contrepoids de se desserrer et de tomber pendant la construction et améliorer la sécurité de fonctionnement.

- **Intégré à la conception de la structure**

Au cours de la phase de conception de l'équipement, le contrepoids en alliage de tungstène peut être intégré dans la structure principale de l'équipement (comme le châssis arrière, les panneaux latéraux, les boucliers, etc.) pour réaliser l'intégration de la structure et du contrepoids, économisant ainsi de l'espace d'installation et améliorant la rigidité de l'ensemble de la machine.

6.5.4 Exemples d'application typiques

Voici des scénarios d'application typiques des contrepoids en alliage de tungstène dans des équipements spécifiques :

- **Système de contrepoids pour grande excavatrice.**

Le module de contrepoids en alliage de tungstène est installé à l'arrière de l'excavatrice afin d'équilibrer les masses dans un espace restreint et d'améliorer la stabilité de la machine face aux mouvements du bras lourd. Lors des opérations sur des plateaux ou dans des zones géologiquement fragiles, le contrepoids bénéficie d'un traitement anti-impact spécial pour éviter les fissures.

- **de chargement**

, le bloc en alliage de tungstène est installé entre l'arrière du véhicule et le châssis. En ajustant sa masse et sa disposition, le rayon de braquage de l'ensemble de la machine et l'équilibre entre le levage et l'abaissement du godet peuvent être optimisés, améliorant ainsi la flexibilité et l'efficacité opérationnelles.

- L'alliage de tungstène est utilisé dans la conception du châssis inférieur et de la poutre d'équilibrage arrière du **système d'optimisation du contrepoids du bulldozer**, de sorte que l'équipement puisse maintenir une forte capacité anti-renversement pendant la propulsion à grande vitesse et les virages serrés, et s'adapter à la construction de sols complexes.

- **Le contrepoids de l'équipement de battage de fondations sur pieux**

utilise la haute densité de l'alliage de tungstène pour ajouter des contrepoids symétriques à la tour principale ou sous l'équipement, compensant efficacement la perturbation du centre de gravité du corps de la machine causée par l'impact de la tête du marteau et améliorant la capacité de contrôle vertical de la position du pieu.

6.5.5 Tendances technologiques futures

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

À l'avenir, avec le développement de la technologie de construction intelligente, des machines et équipements d'ingénierie haut de gamme et de la construction numérique, le système de contrepoids en alliage de tungstène évoluera dans les directions suivantes :

- **Le système de réglage intelligent du contrepoids**
combine une unité de mesure inertielle (IMU), un télémètre laser, un capteur de pression, etc. pour détecter les changements du centre de gravité de l'équipement en temps réel et entraîne le module en alliage de tungstène à se déplacer via un moteur pour obtenir un réglage adaptatif du contrepoids.
- **Conception composite du contrepoids et du système énergétique**
Dans les excavatrices électriques, les bulldozers hybrides et autres équipements, le contrepoids en alliage de tungstène peut également servir de **compartiment de protection de batterie et de blindage de protection du refroidisseur**, réalisant une intégration multiple du poids, de la structure et de la fonction.
- **Fabrication verte et construction de systèmes recyclables**
Avec l'avancement de la politique du double carbone, la production de poids en alliage de tungstène se transformera vers une production à faible émission de carbone et économe en énergie, augmentera le taux de recyclage des poids de déchets et construira un système en boucle fermée d'économie circulaire.
- **Fabrication additive et personnalisation de structures complexes**
Personnalisez les contrepoids en alliage de tungstène à structure complexe grâce à la technologie d'impression 3D pour optimiser davantage la répartition structurelle et la disposition du poids, et vous adapter à la tendance future de la personnalisation personnalisée et en petits lots des équipements de construction.

Résumé du chapitre

Les contrepoids en alliage de tungstène sont largement utilisés et essentiels dans les secteurs de l'automobile et des machines d'ingénierie. Ils couvrent les contrepoids dynamiques pour moteurs et châssis, la distribution de contrepoids pour voitures de course, les modules de contrepoids pour trains à grande vitesse, les contrepoids pour engins de levage et les contrepoids stables pour gros engins de chantier. Grâce à leur excellente densité et à leurs excellentes propriétés mécaniques, les alliages de tungstène ont grandement contribué à la légèreté, aux performances élevées et à la sécurité des véhicules et des machines. Avec le développement de la fabrication intelligente et des technologies des matériaux, la conception des contrepoids en alliage de tungstène évoluera vers une précision, une modularité et une intelligence accrues, propulsant les industries de l'automobile et des machines d'ingénierie vers un niveau d'innovation technologique supérieur.

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/cm³), 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

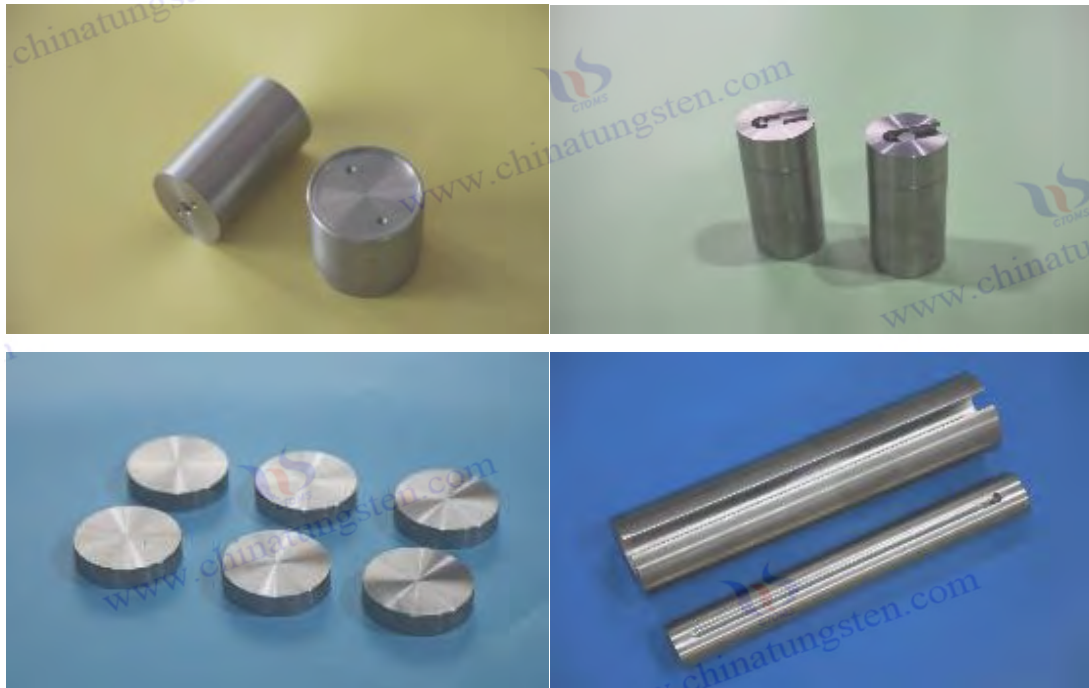
1 billion+ visits to the official website, 1 million+ web pages, 100,000+ customers, 0 complaints in 30 years!

Contact us

Email: sales@chinatungsten.com

Tel: +86 592 5129696

Official website: 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

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



Chapitre 7 Application des contrepoids en alliage de tungstène dans les équipements électroniques et médicaux

7.1 Composants de contrepoids pour instruments de précision et gyroscopes

Dans le domaine des instruments de haute précision, notamment dans les systèmes de navigation inertielle, les contrepoids jouent un rôle essentiel dans l'équilibre des masses. En tant que composant important des systèmes de navigation inertielle, la répartition des masses du rotor et des pièces rotatives des gyroscopes est directement liée à la précision des mesures et à la stabilité du système. L'alliage de tungstène, avec son excellente densité et ses excellentes propriétés mécaniques, présente un avantage irremplaçable pour ce type de contrepoids.

7.1.1 Analyse de cas

Contrepoids du gyroscope de navigation inertielle pour l'aviation

Une entreprise aérospatiale renommée utilise des micropoids en alliage de tungstène pour équilibrer avec précision le rotor de sa nouvelle génération de gyroscopes de navigation inertielle. Avec une densité allant jusqu'à $18,5 \text{ g/cm}^3$, les contrepoids en alliage de tungstène atteignent une précision de masse de l'ordre du microgramme dans un espace très réduit. Cette conception réduit considérablement les vibrations et la force excentrique du rotor causées par une répartition inégale de la masse, supprimant ainsi la source d'erreur dans le processus de mesure.

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

Après une simulation dynamique du système et des tests rigoureux d'équilibrage dynamique, la disposition précise des contrepoids a permis d'améliorer la précision de mesure de la vitesse angulaire par le gyroscope et d'optimiser les performances du système de contrôle d'attitude de l'avion. Cela a permis d'améliorer efficacement la stabilité et la sécurité de la navigation de l'avion, notamment dans les environnements à forte dynamique.

Contrepoids de haute précision pour les équipements d'exploration géologique. En exploration sismique, la stabilité des capteurs de vibrations et des instruments sismiques détermine la précision des données géologiques. Un

fabricant d'équipements d'exploration géologique utilise des contrepoids en alliage de tungstène et les installe dans le système de vibration de l'équipement afin de garantir une sensibilité élevée du capteur aux vibrations infimes du sol.

Les composants en alliage de tungstène garantissent une masse suffisante du bloc de contrepoids dans un volume limité, améliorant ainsi la stabilité mécanique et la capacité anti-interférence de l'équipement. Dans des environnements de terrain complexes, l'instrument maintient des performances stables et la précision de la collecte de données est considérablement améliorée, contribuant ainsi efficacement à l'analyse de la structure géologique et à l'exploration des ressources.

7.1.2 Processus matériel

Procédé de métallurgie des poudres

Les composants lestés en alliage de tungstène sont généralement préparés grâce à une technologie avancée de métallurgie des poudres. La poudre de tungstène de haute pureté est utilisée comme matière première, et une ébauche en alliage de tungstène très dense est formée par frittage à haute température sous vide ou sous atmosphère inerte. Ce procédé élimine les pores et les inclusions, garantissant ainsi une structure interne uniforme et dense.

L'alliage de tungstène fritté présente une excellente résistance mécanique et des propriétés physiques stables, lui permettant de s'adapter à l'environnement d'utilisation à long terme des instruments de précision. Le procédé de métallurgie des poudres permet également d'optimiser la dureté, la ténacité et les performances d'usinage du matériau en ajustant la composition (par exemple, en ajoutant des flux tels que le nickel et le fer) afin de répondre aux exigences spécifiques des différents instruments pour les matériaux de contrepoids.

Usinage et rectification de précision

Le bloc fritté en alliage de tungstène est usiné pour former la base du contrepoids. L'usinage grossier et fin est réalisé à l'aide de machines-outils à commande numérique, associé à une technologie de rectification ultra-précise, pour atteindre une précision dimensionnelle de l'ordre du micron. Le processus de rectification accorde une attention particulière à la planéité de la surface et à la constance dimensionnelle afin de garantir que le bloc de contrepoids réponde aux exigences de conception lors de l'assemblage.

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

Lors de l'usinage, l'apport de chaleur et les paramètres de coupe doivent être rigoureusement contrôlés afin d'éviter les contraintes locales et la déformation du matériau. Pour les composants de contrepoids ultra-compacts, des technologies de micro-usinage telles que l'usinage par électroérosion (EDM) peuvent également être utilisées pour réaliser des pièces de précision de formes complexes.

Traitement de surface

Afin d'améliorer la résistance à la corrosion et l'état de surface des composants du contrepoids, des procédés de polissage chimique, de polissage mécanique et de placage métallique sont souvent utilisés. Le polissage chimique permet d'éliminer les défauts microscopiques de surface, de réduire le coefficient de frottement et de limiter le risque de perte de particules.

Le placage de surface (nickelage, dorure, etc.) améliore non seulement la résistance à la corrosion, mais aussi les performances d'assemblage des composants et prévient les variations dimensionnelles et les mauvais contacts causés par l'oxydation. Pour des applications spécifiques, les surfaces des alliages de tungstène sont également traitées avec des revêtements anti-rayonnement ou anti-usure afin d'améliorer leur adaptabilité environnementale.

7.1.3 Méthode de conception

Analyse de simulation de distribution de masse

Lors de la phase de conception, une analyse par éléments finis (AEF) a été utilisée pour simuler le comportement dynamique du rotor du gyroscope, en se concentrant sur l'impact de la répartition des masses sur sa stabilité en rotation. La simulation de différents schémas de pondération a permis de déterminer la position, la forme et la masse optimales du bloc de masse pour obtenir un équilibre optimal de l'inertie du rotor.

Le processus de simulation combine le mode de vibration du rotor pour prédire la fréquence et l'amplitude de résonance possibles, évite les vibrations non linéaires et l'instabilité dynamique du système et améliore la fiabilité globale de l'équipement.

Test d'équilibre dynamique

Après la fabrication, le rotor et ses éléments de masselotte assemblés sont testés à l'aide d'une machine d'équilibrage dynamique de haute précision. La direction et l'amplitude de l'écart sont déterminées en mesurant la force de déséquilibre et l'amplitude des vibrations pendant la rotation du rotor.

Les données d'essai sont transmises à l'équipe de conception pour orienter le réglage fin, l'augmentation ou la diminution du contrepoids, afin de garantir une rotation fluide de la machine et le respect des spécifications de conception. Ce processus est répété plusieurs fois jusqu'à atteindre la précision d'équilibrage prédéterminée, au microgramme près.

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

Conception tolérante aux pannes

Compte tenu des erreurs dans les processus de fabrication et d'assemblage, la conception réserve un équilibre pour le réglage du contrepoids afin que la masse et la position du bloc de contrepoids puissent être ajustées dans une petite plage pour compenser les tolérances de traitement et les erreurs d'assemblage.

La conception tolérante aux pannes comprend également l'interchangeabilité des modules de contrepoids pour faciliter la maintenance et le réglage sur site, garantissant la stabilité et la fiabilité de l'instrument lors d'une utilisation à long terme.

Bloc tungstène 7.2 pour module anti-tremblement de caméra de téléphone portable (OIS)

Avec l'amélioration continue des fonctionnalités des appareils photo des smartphones, la stabilisation optique de l'image (OIS) est devenue l'une des technologies clés pour garantir la clarté des images et la stabilité vidéo. Les micro-poids en alliage de tungstène sont largement utilisés dans les systèmes anti-vibrations des modules photo en raison de leur haute densité, de leur résistance élevée et de leurs excellentes performances de traitement, améliorant considérablement l'efficacité anti-vibrations et la réactivité.

7.2.1 Analyse de cas

conception de blocs de tungstène pour une marque de smartphones bien connue

Dans le contexte concurrentiel actuel des smartphones, une marque renommée a pris l'initiative d'utiliser des micro-poids en alliage de tungstène pour remplacer les traditionnels matériaux anti-vibrations à base de plomb. La densité de l'alliage de tungstène est d'environ $11,3 \text{ g/cm}^3$, bien supérieure à celle de l'alliage de plomb, ce qui permet d'obtenir des poids de meilleure qualité dans un volume très réduit. Cette conception réduit le poids total du module anti-vibrations d'environ 30 % et son volume de 20 %, améliorant ainsi considérablement la réactivité et la sensibilité de l'appareil photo.

Le bloc de tungstène optimise le moment d'inertie, améliorant ainsi la réponse à l'accélération angulaire du mécanisme anti-tremblement et réduisant efficacement le flou de l'image causé par les tremblements ou les mouvements de la main. De plus, les excellentes propriétés mécaniques et la résistance à l'usure de l'alliage de tungstène garantissent un fonctionnement stable et durable du module, améliorant ainsi considérablement sa fiabilité.

Système de contrepoids à technologie anti-tremblement multi-axes

Les modules de caméra des smartphones modernes utilisent une technologie anti-tremblement multi-axes, qui nécessite que le système de contrepoids puisse réaliser un réglage dynamique de l'équilibre dans plusieurs directions, telles que les axes X et Y. Le micro-contrepoids en alliage de tungstène est conçu comme une structure à plusieurs étages, qui coopère avec le capteur de haute

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

précision intégré à la caméra pour collecter les données de mouvement et réaliser un réglage anti-tremblement multi-axes en temps réel.

Cette structure utilise différentes conceptions de distribution et de forme de blocs de tungstène pour optimiser le moment d'inertie, permettant au système anti-tremblement d'obtenir le meilleur effet d'équilibre dans plusieurs dimensions, réduisant efficacement le flou de mouvement dans les environnements de mouvement et de vibration à grande vitesse, et améliorant la clarté de l'image et la stabilité vidéo.

7.2.2 Processus matériel

Processus de sélection et de frittage de poudre ultrafine

Les contrepoids en alliage de tungstène utilisent une poudre de tungstène ultrafine, dont la granulométrie est inférieure à 1 μm , pour garantir une structure très dense et uniforme lors du frittage. Le frittage à haute température et haute pression, généralement supérieur à 1 500 °C, favorise la diffusion et la liaison complètes des particules de poudre, élimine les pores et améliore la résistance mécanique et la densité du matériau.

En optimisant les paramètres du processus, nous pouvons atteindre l'objectif d'absence de microfissures et de défauts significatifs à l'intérieur du substrat en alliage de tungstène, garantissant ainsi que le contrepoids présente une excellente résistance à la fatigue et des propriétés physiques stables.

Micro-usinage et intégration MEMS

Le bloc de tungstène est formé et usiné par micro-usinage CNC et découpe laser pour un usinage précis des contours. Ce procédé permet d'obtenir des tolérances de l'ordre du micron, répondant ainsi aux exigences strictes de contrôle de la taille et de la forme des contrepoids des modules d'appareil photo des téléphones portables.

Le bloc de tungstène traité est parfaitement intégré au mécanisme anti-tremblement MEMS du module caméra. Grâce à une structure de connexion judicieuse, le bloc de tungstène est étroitement associé aux micromoteurs, aux ressorts et aux autres composants pour garantir la stabilité de l'ensemble et une réponse dynamique optimale.

Traitement de revêtement de surface

Afin de réduire les frottements entre le contrepoids et le mécanisme adjacent et d'éviter la dégradation des performances due à l'oxydation, un revêtement dur est généralement appliqué sur la surface du bloc de tungstène. Les matériaux de revêtement couramment utilisés sont le nitrure de titane (TiN) et le nitrure de chrome (CrN). Ces films offrent non seulement d'excellentes propriétés de résistance à l'usure et de lubrification, mais ils préviennent également efficacement l'oxydation environnementale et prolongent la durée de vie du contrepoids.

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

De plus, l'épaisseur du revêtement est généralement contrôlée à quelques microns près, ce qui garantit non seulement les performances de protection mais évite également d'affecter la répartition de la masse et les performances dynamiques du contrepoids.

7.2.3 Méthode de conception

Simulation couplée multi-physique

La conception du bloc de tungstène prend en compte non seulement la dynamique mécanique, mais aussi les effets de l'électromagnétisme et de la conduction thermique. Un logiciel de simulation de couplage de champ multiphysique est utilisé pour simuler la réponse mécanique, l'effet d'entraînement électromagnétique et la distribution thermique du module anti-vibrations en conditions de fonctionnement réelles.

En optimisant la forme et la distribution de masse du bloc de tungstène par simulation, le moment d'inertie est maximisé et le rapport de masse est optimal, garantissant que le mécanisme anti-tremblement reste réactif et consomme un minimum d'énergie pendant le mouvement multi-axes à grande vitesse.

Prototypage rapide et conception itérative

Compte tenu de la forme complexe et des exigences de haute précision des contrepoids en alliage de tungstène, l'équipe de conception a utilisé l'impression 3D pour fabriquer des moules de haute précision, réduisant ainsi considérablement le cycle de développement. Grâce à un prototypage rapide pour valider les idées de conception, combiné aux retours d'essais d'assemblage réels, plusieurs cycles d'optimisation itérative ont été réalisés afin d'améliorer l'adéquation entre la précision de la conception et le processus de fabrication.

Cette méthode réduit non seulement les risques de développement, mais accélère également le lancement du produit, répondant ainsi aux besoins de mises à jour rapides dans l'industrie de la téléphonie mobile.

Contrôle de précision d'assemblage intégré

Afin de garantir la précision de positionnement répétée du bloc de contrepoids pendant le processus d'assemblage, la rainure de montage et la structure encliquetable sont prises en compte lors de la conception du bloc de tungstène pour garantir que le bloc de tungstène peut être intégré avec précision dans le cadre du module anti-tremblement pour éviter l'impact de l'écart d'assemblage sur l'effet anti-tremblement.

De plus, la conception du dispositif de la ligne d'assemblage automatisée peut permettre un processus d'assemblage efficace et stable, améliorer le taux de rendement et la cohérence de la production et garantir que chaque module de caméra présente les performances anti-tremblement attendues.

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

7.3 Conception de poids stable pour les équipements CT et IRM

Les équipements de tomodesitométrie (TDM) et d'imagerie par résonance magnétique (IRM) sont au cœur de l'imagerie médicale moderne. Leur stabilité de fonctionnement et la qualité de l'image influencent directement l'efficacité du diagnostic et l'expérience du patient. Les contrepoids en alliage de tungstène sont largement utilisés dans les composants clés de ces équipements en raison de leur densité élevée, de leurs excellentes propriétés mécaniques et de leur amagnétisme, notamment pour le réglage de l'équilibre et le contrôle des vibrations des plateaux tournants et des pièces mobiles.

7.3.1 Analyse de cas

Contrepoids du plateau tournant du scanner CT

Un fabricant international d'équipements médicaux de renom utilise des contrepoids en alliage de tungstène haute densité pour optimiser l'équilibre dynamique du plateau tournant de son nouveau scanner. Lorsque le plateau tourne à grande vitesse, un poids inégal produit d'importantes vibrations, augmente le bruit et brouille l'image, affectant ainsi la précision du diagnostic.

Grâce au calcul précis du moment d'inertie du plateau tournant et à la combinaison de celui-ci avec les caractéristiques de haute densité des contrepoids en alliage de tungstène, le module de contrepoids est conçu pour être compact et massif, permettant au plateau tournant d'atteindre un équilibre idéal lors de rotations à grande vitesse. Cette solution d'optimisation a permis de réduire l'amplitude des vibrations du plateau tournant de plus de 40 %, de diminuer significativement le bruit de l'équipement et d'améliorer significativement le confort du patient et la clarté des images diagnostiques.

système de poids en alliage de tungstène pour appareil IRM

Les équipements d'IRM sont soumis à des exigences extrêmement strictes concernant les propriétés magnétiques des matériaux. Toute impureté magnétique affecte l'uniformité du champ magnétique haute fréquence, réduisant ainsi la qualité de l'image. Le fabricant d'équipements médicaux utilise des alliages de tungstène de haute pureté et prépare des contrepoids en alliage de tungstène amagnétique par fusion sous vide et usinage de précision.

Le contrepoids en tungstène du système est conçu de manière scientifique et rationnelle, empêchant efficacement la distorsion du champ magnétique et les interférences de signal, et assurant un fonctionnement stable de l'équipement dans un environnement à fort champ magnétique. Le système de contrepoids non magnétique garantit la haute résolution de l'imagerie IRM et constitue l'une des technologies clés pour garantir la précision du diagnostic clinique.

7.3.2 Processus matériel

Fusion d'alliages de tungstène de haute pureté

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

Les contrepoids en alliage de tungstène nécessitent d'abord des matériaux de haute pureté et non magnétiques. Grâce à la technologie avancée de fusion à l'arc sous vide (VAR), par fusion et affinage multiples, les impuretés magnétiques et les inclusions gazeuses sont éliminées du matériau afin de garantir la pureté et l'uniformité structurelle de l'alliage.

De plus, un contrôle strict de la composition et un processus de traitement thermique uniforme sont utilisés pour conférer à l'alliage de tungstène une structure de grain uniforme et des propriétés mécaniques stables, répondant aux doubles exigences des équipements médicaux pour les matériaux non magnétiques et la haute résistance.

Usinage CNC et soudage laser

Les ébauches en alliage de tungstène de haute pureté sont transformées en blocs de contrepoids aux formes complexes par usinage CNC de précision, garantissant un contrôle des tolérances dimensionnelles au micron près. Le soudage laser permet ensuite d'assembler de manière fiable plusieurs modules de contrepoids. Les soudures sont fines et résistantes, évitant ainsi les problèmes de zone affectée thermiquement et de concentration de contraintes liés aux procédés de soudage traditionnels.

Le soudage au laser assure la stabilité et la durabilité de la structure globale du système de contrepoids, répondant aux besoins de fonctionnement continu à long terme de l'équipement.

Traitement de protection de surface

Afin d'améliorer la résistance à l'usure et à la corrosion du contrepoids, un revêtement céramique en oxyde d'aluminium est généralement appliqué sur la surface de l'alliage de tungstène. Ce revêtement, d'une grande dureté, résiste efficacement à l'usure mécanique et à la corrosion environnementale, prolongeant ainsi la durée de vie du contrepoids.

De plus, le revêtement possède de bonnes propriétés d'isolation, ce qui permet d'éviter les interférences électromagnétiques à l'intérieur de l'équipement et d'assurer les performances stables de l'équipement d'imagerie.

7.3.3 Méthode de conception

Combinaison de la mécanique des structures avec la simulation du champ magnétique

Lors de la conception du contrepoids, la mécanique des structures et la simulation du couplage du champ magnétique sont utilisées pour analyser en profondeur les contraintes du bloc de contrepoids et leurs interférences avec le champ magnétique de l'IRM. Le modèle par éléments finis prend en compte simultanément la répartition des contraintes mécaniques et l'uniformité du champ magnétique afin d'optimiser la taille et la disposition du bloc en alliage de tungstène.

Cette méthode évite efficacement les problèmes de distorsion du champ magnétique et d'instabilité mécanique causés par une conception déraisonnable du contrepoids, garantissant ainsi le fonctionnement sûr de l'équipement et la précision de l'imagerie.

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

Concept de conception modulaire

Le module de contrepoids en alliage de tungstène adopte une conception standardisée pour former une unité de contrepoids amovible. Cette conception facilite la maintenance et le remplacement sur site, améliore l'efficacité de la maintenance des équipements et réduit les coûts de maintenance.

La structure modulaire prend également en charge des solutions de contrepoids personnalisées pour différents types d'équipements, améliorant ainsi la flexibilité de conception et l'efficacité de fabrication.

Conception de contrôle du bruit et des vibrations

Le système de contrepoids combine des matériaux amortisseurs et une structure d'isolation des vibrations pour obtenir de multiples effets de réduction des vibrations et du bruit. Les blocs de contrepoids en alliage de tungstène sont judicieusement disposés pour réduire l'amplitude des vibrations mécaniques, et la couche d'amortissement absorbe efficacement l'énergie vibratoire et ralentit la propagation du bruit.

Cette conception améliore la stabilité de l'équipement pendant le fonctionnement et le confort des patients, répondant à la demande clinique d'un environnement calme.

7.4 Structure d'équilibrage mobile de l'équipement de radiothérapie

Dans les équipements de radiothérapie, la précision des mouvements mécaniques et l'équilibre sont essentiels pour garantir l'efficacité du traitement et la sécurité des patients. L'alliage de tungstène est largement utilisé dans la structure mobile des contrepoids des équipements de radiothérapie en raison de sa densité élevée, de sa résistance élevée et de ses excellentes performances d'usinage. Il garantit la stabilité et la précision de positionnement de la tête de radiothérapie et du bras mécanique dans des mouvements à plusieurs degrés de liberté.

7.4.1 Analyse de cas

Contrepoids de la tête de poutre de l'accélérateur linéaire

Un fabricant international de premier plan d'équipements médicaux a conçu un système de contrepoids en alliage de tungstène pour la tête de radiographie d'un accélérateur linéaire. Lorsque la tête de radiographie pivote sur plusieurs degrés de liberté, le contrepoids équilibre l'équipement grâce à une répartition précise de la masse, évitant ainsi les vibrations causées par un déséquilibre affectant le positionnement du traitement.

Le contrepoids en alliage de tungstène, de petite taille et de grande masse, répond aux exigences de réglage du poids grâce à la structure compacte de la tête de radiographie, améliorant ainsi la précision du traitement et la stabilité de l'équipement. L'utilisation clinique montre que cette conception de contrepoids réduit considérablement les erreurs mécaniques et les vibrations, et améliore la sécurité du traitement des patients.

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

Conception d'un contrepoids pour un manipulateur robotisé de radiothérapie

Les bras robotisés de radiothérapie modernes utilisent une conception multi-articulaire, et le système de contrepoids doit répondre aux exigences de stabilité dans une amplitude de mouvement complexe. Un fabricant de dispositifs médicaux a développé une solution basée sur des contrepoids modulaires en alliage de tungstène, qui assure l'équilibre dynamique du bras robotisé dans différentes postures en combinant des contrepoids de masses et de tailles différentes.

Cette conception améliore la flexibilité et la capacité de charge du bras robotique, permettant à l'équipement de radiothérapie de localiser rapidement et précisément la zone cible du traitement, améliorant ainsi l'efficacité du traitement et le confort du patient.

7.4.2 Processus matériel

Moulage mixte de poudre d'alliage de tungstène haute densité

De la poudre de tungstène de haute pureté est mélangée à des additifs d'alliage en proportions égales, et des contrepoids en alliage de tungstène aux formes complexes sont formés par pressage isostatique à froid. Ce pressage isostatique à froid garantit une densité et une homogénéité du matériau, idéales pour la production de contrepoids aux formes géométriques complexes et aux performances mécaniques élevées.

Ce procédé évite le risque de déformation lors du frittage à haute température, améliore la précision dimensionnelle et les propriétés mécaniques du produit fini et répond aux exigences des équipements de radiothérapie pour les matériaux à haute stabilité.

Technologie de découpe et de soudage de précision

Après formage, le contrepoids en alliage de tungstène est usiné avec précision par découpe au fil afin d'obtenir la taille et la structure souhaitées. Lors de l'assemblage de plusieurs pièces, le soudage laser assure la résistance et l'étanchéité des joints. La zone affectée thermiquement par le soudage est réduite afin d'éviter toute dégradation des performances du matériau.

La combinaison de la découpe de précision et de la technologie de soudage laser répond aux exigences élevées des structures de contrepoids complexes et garantit la stabilité et la durabilité à long terme de l'ensemble.

Revêtement résistant aux radiations

Les équipements de radiothérapie sont exposés à des rayonnements de forte intensité pendant une longue période, et la surface du contrepoids est facilement affectée par les radiations, ce qui entraîne une dégradation des performances du matériau. La pulvérisation de revêtements spéciaux résistants aux radiations (tels que des matériaux composites aluminium-silicium céramique) peut prévenir efficacement les dommages causés par les radiations à la surface du contrepoids.

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

Ce revêtement améliore non seulement la résistance à l'usure et à la corrosion, mais prolonge également la durée de vie du contrepoids et garantit un fonctionnement stable et à long terme de l'équipement.

7.4.3 Méthode de conception

Simulation d'équilibre dynamique

Un logiciel de simulation de dynamique multi-corps est utilisé pour simuler l'équilibre dynamique du robot de l'équipement de radiothérapie et de la tête d'irradiation sous différentes trajectoires de mouvement. L'analyse de la force d'inertie et de la distribution des moments permet de concevoir avec précision la masse et la position du contrepoids afin d'assurer la stabilité de l'équipement lors de mouvements à plusieurs degrés de liberté.

La simulation dynamique peut également prédire les vibrations potentielles et les concentrations de contraintes lors du mouvement de l'équipement, guidant ainsi une conception optimisée et réduisant la fatigue mécanique.

Structure modulaire et réglable

La structure lestée est conçue comme une unité modulaire, facile à assembler, à régler et à équilibrer sur site. Cette conception modulaire offre diverses options de configuration pour s'adapter aux différents modèles d'équipement et aux besoins de traitement.

Le contrepoids peut être rapidement démonté et remplacé grâce à des connexions filetées, des loquets ou des boucles, améliorant considérablement l'efficacité de la maintenance et la commodité des réglages sur site.

Ergonomie et sécurité

La conception du contrepoids prend pleinement en compte la sécurité et la facilité d'entretien des opérateurs. Les modules de contrepoids sont disposés judicieusement pour préserver l'espace de travail et réduire les risques de collision accidentelle.

Dans le même temps, le mécanisme de verrouillage et de déverrouillage facile à utiliser est conçu pour permettre aux techniciens d'effectuer rapidement les travaux de maintenance, de réduire les temps d'arrêt de l'équipement et d'assurer la continuité du travail clinique.

7.5 Systèmes de contrepoids pour micro-drones et appareils portables

7.5.1 Analyse de cas

- **Contrepoids de stabilité de vol pour micro drone**

Un certain micro drone de qualité militaire utilise des micro-contrepoids en alliage de

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

tungstène pour obtenir un réglage précis du centre de gravité du corps, améliorant ainsi la stabilité du vol et la résistance au vent.

- **d'équilibrage des instruments électroniques portables**
sont utilisés dans les instruments de test médicaux portables pour obtenir un équilibre de maintien et un fonctionnement stable.

7.5.2 Processus matériel

- **Le micro-usinage ultra-précis**
utilise la technologie d'usinage par ultrasons et par électro-étincelles pour terminer la fabrication de contrepoids en alliage de tungstène avec une précision de l'ordre du micron.
- **Le nanotraitement de surface et**
le nanorevêtement améliorent la dureté de surface et la résistance à la corrosion du matériau, le rendant ainsi adapté à une utilisation dans des environnements complexes.
- **La fabrication intégrée**
combinée à l'intégration de composants microélectroniques permet d'obtenir une structure compacte et des fonctions complexes.

7.5.3 Méthode de conception

- **La conception de réglage dynamique du centre de gravité**
est conçue avec un module de contrepoids réglable pour prendre en charge le réglage de l'équilibre dynamique du drone pendant le vol et améliorer la flexibilité.
- **Équilibre entre légèreté et haute résistance**
Envisagez de manière exhaustive la combinaison d'un contrepoids en alliage de tungstène et de matériaux légers pour obtenir des performances globales optimales.
- **Conception d'adaptabilité environnementale**
Le système de contrepoids multifonctionnel est conçu pour être résistant aux tremblements de terre, à l'eau, à la poussière, etc. afin de garantir un fonctionnement fiable et à long terme de l'équipement.

7.5 Systèmes de contrepoids pour micro-drones et appareils portables

Avec l'utilisation généralisée des micro-drones et des appareils électroniques portables, les exigences en matière de stabilité, de flexibilité, de volume et de poids des équipements ne cessent de croître. L'alliage de tungstène est devenu un matériau essentiel pour le système de contrepoids de ces appareils en raison de sa densité élevée et de ses excellentes propriétés mécaniques. Grâce à une conception précise de la répartition des masses et à une technologie de fabrication avancée, ce système de contrepoids améliore efficacement les performances et l'adaptabilité environnementale des équipements.

7.5.1 Analyse de cas

Poids de stabilisation de vol pour micro-drone

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

Un micro-drone de qualité militaire utilise un micro-poids en alliage de tungstène pour ajuster précisément le centre de gravité de son fuselage. Cet alliage de tungstène haute densité permet d'obtenir une masse importante dans un espace très réduit, ce qui permet d'affiner le centre de gravité du drone et d'optimiser son attitude de vol et ses performances aérodynamiques.

Cette conception améliore considérablement la stabilité de vol et la résistance au vent du drone, en particulier dans des conditions de vent complexes et des conditions de manœuvre à grande vitesse, démontrant une excellente précision de contrôle, garantissant la fiabilité et la sécurité de l'exécution de la mission.

Poids d'équilibrage pour instruments électroniques portables

Dans les instruments de test médicaux portables, des contrepoids en alliage de tungstène sont utilisés pour optimiser l'équilibre de l'équipement et réduire la fatigue de l'utilisateur. Une configuration appropriée du contrepoids améliore le confort et la stabilité de l'équipement, garantissant ainsi la précision et la commodité des tests.

Les contrepoids en alliage de tungstène sont compacts et efficaces, répondant aux doubles exigences des appareils portables en matière de portabilité et de hautes performances, et améliorant la compétitivité du marché des produits.

7.5.2 Traitement des matériaux

Micro-usinage de très haute précision

Les contrepoids en alliage de micro-tungstène utilisent l'usinage par ultrasons et l'électroérosion (EDM) pour garantir une précision dimensionnelle au micron. L'usinage par ultrasons offre une efficacité de coupe élevée et un faible impact thermique, et convient au moulage de structures complexes et fines.

L'usinage par électroérosion peut traiter des trous intérieurs complexes et des structures fines de matériaux en alliage de tungstène à haute dureté pour répondre aux exigences de complexité de forme et de précision des micro-poids.

Nano-traitement de surface

Les contrepoids en alliage de tungstène sont traités avec des revêtements nanométriques, tels que des revêtements en nano-oxyde ou des nanofilms de nitrure de titane (TiN), qui améliorent considérablement la dureté de surface et la résistance à la corrosion. Les nanorevêtements peuvent également améliorer la résistance à l'usure des contrepoids et résister efficacement à l'humidité ambiante, au brouillard salin et à la corrosion chimique.

Cette technologie de traitement de surface garantit le fonctionnement stable à long terme du système de contrepoids dans des environnements extérieurs complexes et prolonge sa durée de vie.

Fabrication intégrée

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

Le système de contrepoids en alliage de tungstène est hautement intégré aux composants microélectroniques pour une structure compacte et multifonctionnelle. Grâce à une conception précise, le contrepoids s'intègre parfaitement au circuit imprimé, au capteur et à l'actionneur, réduisant ainsi le volume global et améliorant l'intégration et la fiabilité de l'équipement.

La fabrication intégrée raccourcit efficacement le processus d'assemblage, réduit les coûts de production et améliore la capacité anti-interférence et la stabilité opérationnelle du système.

7.5.3 Méthode de conception

Conception de réglage dynamique du centre de gravité

La conception d'un module de contrepoids réglable en alliage de tungstène permet au drone d'ajuster son centre de gravité en fonction de l'état de vol en temps réel. La conception dynamique du contrepoids combine les données des capteurs et ajuste sa position grâce à un mécanisme de micro-entraînement pour une optimisation adaptative de l'attitude de vol.

Cette conception améliore l'adaptabilité du drone aux perturbations extérieures et sa maniabilité, garantissant ainsi la sécurité du vol et la qualité de réalisation de la mission.

Équilibre entre légèreté et haute résistance

L'association de contrepoids haute densité en alliage de tungstène et de structures en matériaux légers (comme la fibre de carbone et l'alliage d'aluminium) permet d'optimiser les performances globales. Grâce à une conception collaborative multi-matériaux, le système de contrepoids offre un équilibre parfait entre légèreté et robustesse.

Cette méthode prend en compte à la fois le contrôle du poids et la stabilité structurelle de l'avion, améliorant ainsi son endurance et sa capacité de charge.

Conception adaptable à l'environnement

Pour répondre aux exigences d'utilisation des drones et des appareils portables dans des environnements changeants, nous avons conçu un système de contrepoids multifonctionnel résistant aux chocs, à l'eau et à la poussière. L'utilisation de structures étanches et de matériaux amortissant les vibrations réduit efficacement l'impact des chocs mécaniques sur le contrepoids et l'ensemble de l'équipement.

La conception adaptable à l'environnement garantit que l'équipement maintient des performances stables et un fonctionnement fiable dans des conditions climatiques extrêmes et des conditions de terrain complexes.

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/cm³), 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

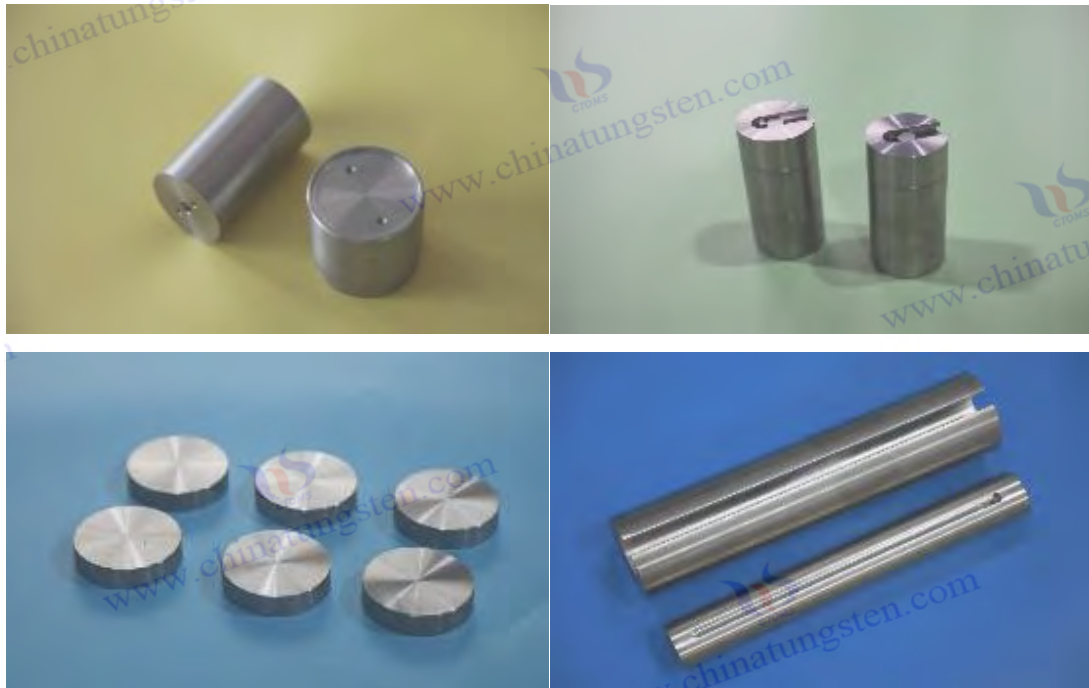
1 billion+ visits to the official website, 1 million+ web pages, 100,000+ customers, 0 complaints in 30 years!

Contact us

Email: sales@chinatungsten.com

Tel: +86 592 5129696

Official website: 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

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



Chapitre 8 Application des contrepoids en alliage de tungstène dans les domaines sportifs et civils

La technologie des contrepoids en alliage de tungstène est largement utilisée dans les équipements sportifs et les produits civils en raison de sa densité élevée, de sa résistance élevée et de ses excellentes performances d'usinage. Grâce à une conception précise de la répartition des masses, les contrepoids en alliage de tungstène améliorent non seulement les performances des équipements sportifs, mais optimisent également l'expérience utilisateur, favorisant ainsi la modernisation technologique et le développement du marché des industries concernées.

8.1 Conception du poids des clubs de golf et des boules de bowling

8.1.1 Conception du poids des clubs de golf

La performance d'un club de golf est étroitement liée à la vitesse de swing, à la stabilité et à la précision de frappe. Une conception au poids raisonnable peut améliorer considérablement l'équilibre et l'inertie du club, améliorant ainsi l'effet de frappe.

L'alliage de tungstène permet une meilleure répartition de la masse dans un espace restreint, ce qui concentre le poids de la tête de club, augmente le moment d'inertie à la frappe et améliore ainsi la stabilité et la tolérance aux pannes du club. Grâce à ces poids, les clubs de golf bénéficient des avantages suivants :

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

- **Vitesse de swing améliorée** : une répartition raisonnable du poids réduit la charge globale du swing et améliore l'efficacité du swing du joueur.
- **Stabilité de frappe améliorée** : La haute densité de l'alliage de tungstène augmente l'inertie de la tête du club et réduit l'erreur de déviation par rapport au centre de frappe.
- **Sensation de swing optimisée** : le réglage du poids optimise la position du centre de gravité pour améliorer la sensation de swing et le retour d'information.

Au cours du processus de fabrication, les poids en alliage de tungstène sont généralement intégrés à la structure de la tête du club grâce à un usinage de précision et une conception intégrée pour garantir que la position du poids est précise et ferme.

8.1.2 Conception du poids des boules de bowling

La conception du poids d'une boule de bowling influence directement sa stabilité et sa précision de contrôle. Les poids en alliage de tungstène sont largement utilisés dans le système de lestage interne des boules de bowling afin d'améliorer leurs performances globales.

Grâce à la haute densité de l'alliage de tungstène, le poids est réparti avec précision à l'intérieur de la balle, ce qui optimise l'inertie de roulement et la stabilité de la trajectoire, permettant aux joueurs d'obtenir un contrôle de balle plus précis et des effets de choc plus puissants. Parmi les avantages spécifiques, on peut citer :

- **Contrôle précis de la trajectoire** : les poids en alliage de tungstène ajustent l'inertie de roulement et améliorent les performances de roulement de la balle sur la piste.
- **Stabilité de rotation améliorée** : les poids haute densité réduisent les vibrations causées par l'excentricité et assurent une rotation en douceur.
- **Sensation de confort** : les blocs de poids sont raisonnablement disposés pour améliorer la sensation de stabilité lors de la prise et du relâchement de la balle.

Les poids en alliage de tungstène sont souvent fabriqués selon des conceptions modulaires pour faciliter les ajustements et la maintenance personnalisés, tout en améliorant la durabilité et la durée de vie de la balle.

8.2 Poids pour les équipements de tir sportif

Les sports de tir exigent une précision et une stabilité exceptionnelles du matériel, et le système de contrepoids joue un rôle essentiel dans les carabines, les pistolets et autres équipements de tir. Des contrepoids bien conçus permettent non seulement de réduire efficacement le recul et les vibrations, mais aussi d'optimiser la sensation de tir, d'améliorer la précision et la stabilité du tir.

8.2.1 Exigences de conception du contrepoids

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

La conception du poids des équipements de tir se concentre principalement sur les aspects suivants :

- **Réduire l'impact du recul** : En augmentant la masse du corps de l'arme et en la répartissant raisonnablement, l'impact du recul sur le tireur peut être réduit.
- **Améliorer la stabilité de la visée** : ajouter un contrepoids avant pour améliorer l'équilibre du pistolet et réduire les tremblements lors de la visée.
- **Stabilité mécanique améliorée** : équilibrez la structure du pistolet pour éviter que les vibrations et les oscillations pendant le tir n'affectent la précision du tir.
- **Optimisation ergonomique** : La conception du poids prend en compte le confort d'utilisation du tireur, garantissant ainsi une réduction de la fatigue lors des tirs de longue durée.

8.2.2 Avantages de l'alliage de tungstène dans le poids des équipements de tir

L'alliage de tungstène comme matériau de contrepoids présente des avantages significatifs dans les équipements de tir :

- **Une densité élevée permet une concentration du poids** : la densité de l'alliage de tungstène est d'environ $19,3 \text{ g/cm}^3$, bien supérieure à celle du plomb et de l'acier. Il permet d'obtenir une masse plus importante dans un espace restreint et d'améliorer efficacement l'équilibrage du poids.
- **Excellentes propriétés mécaniques** : bonne résistance et résistance à l'usure, assurant la stabilité structurelle et la durabilité du contrepoids pendant le tir.
- **Respect de l'environnement** : Comparé aux poids en plomb traditionnels, l'alliage de tungstène est non toxique et respectueux de l'environnement, répondant aux exigences de santé et de sécurité des équipements sportifs modernes.
- **Facile à traiter et à personnaliser** : l'alliage de tungstène peut être traité par métallurgie des poudres et usinage de précision pour obtenir une conception de poids complexe afin de répondre aux besoins de différents modèles d'armes à feu.

8.2.3 Cas d'application typiques

- **Contrepoids avant pour carabine de compétition.**
Une carabine de compétition internationale utilise un contrepoids avant en alliage de tungstène, qui réduit efficacement l'impact du recul et améliore la stabilité du tir en rafale. Le contrepoids est installé à l'avant du canon grâce à un usinage de précision pour assurer l'équilibre général de l'arme sans compromettre sa portabilité.
- **Lestage interne de la poignée pistolet :**
un micro-poids en alliage de tungstène est intégré à l'intérieur d'un pistolet haute performance afin d'optimiser le centre de gravité de la poignée et d'améliorer la sensation de stabilité du tireur lors de la prise en main. Cette conception améliore le ressenti au tir et augmente la vitesse et la précision de la visée.
- **Le système de réglage du poids de queue du fusil de précision**
adopte un contrepoids modulaire en alliage de tungstène. Le fusil de précision permet

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

d'ajuster le poids de queue de manière flexible selon les besoins du tireur, de personnaliser son arme et d'améliorer la précision et le confort du tir à longue distance.

8.3 Poids des articles de pêche et systèmes d'équilibrage des modèles réduits d'avions

Les engins de pêche et les modèles réduits d'avions sont des équipements importants pour les loisirs civils, et les exigences de performance des systèmes de lestage augmentent. Une conception à poids raisonnable améliore non seulement l'expérience d'utilisation et les performances des équipements, mais favorise également l'utilisation généralisée des alliages de tungstène dans le domaine civil.

8.3.1 Conception du poids du matériel de pêche

Exigences en matière de contrepoids

Les lests pour articles de pêche sont principalement utilisés dans les cannes à pêche, les lignes et les flotteurs. Leurs principaux objectifs sont :

- **Améliorer la distance et la précision du lancer** : En équilibrant correctement les poids, l'inertie lors du lancer est augmentée et la distance et la stabilité du lancer sont améliorées.
- **Sensation de fonctionnement améliorée** : répartition équilibrée du poids de la tige, fatigue du poignet réduite et confort amélioré pendant de longues heures de fonctionnement.
- **Ajustez la sensibilité du flotteur** : contrôlez avec précision le poids du flotteur pour améliorer la sensibilité des signaux des poissons et aider les pêcheurs à détecter les signaux de morsure des poissons à temps.

Avantages de l'alliage de tungstène

- **La haute densité permet un poids compact** : l'alliage de tungstène a une densité élevée et peut atteindre une grande masse dans un très petit volume, répondant à la tendance des engins de pêche légers.
- **Forte résistance à la corrosion** : après traitement de surface, l'alliage de tungstène possède d'excellentes propriétés d'étanchéité et d'anticorrosion et convient à une variété d'environnements aquatiques.
- **Flexibilité de traitement** : l'alliage de tungstène peut être personnalisé en différentes formes grâce à un traitement de précision pour répondre aux exigences de conception de différents équipements de pêche.

Cas typiques

Une marque de cannes à pêche haut de gamme utilise des lests en alliage de tungstène intégrés au manche et au scion pour améliorer considérablement l'équilibre et la précision des lancers. Des tests réels ont montré que la distance de lancer des cannes lestées en alliage de tungstène est augmentée de 15 %, améliorant considérablement l'expérience de pêche.

8.3.2 Système d'équilibrage des modèles réduits d'aéronefs

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

Exigences de conception du contrepoids

Le système de poids des modèles d'avions est conçu pour optimiser l'attitude de vol des modèles réduits d'avions, de drones et d'hélicoptères, en se concentrant sur :

- **Stabilité de vol** : Assurer l'équilibre et la stabilité pendant le vol en ajustant le centre de gravité du fuselage.
- **Sensibilité de contrôle** : Une répartition raisonnable du poids améliore la vitesse de réponse et améliore la contrôlabilité et la maniabilité du vol.
- **Structure légère** : Tout en assurant l'effet de contrepoids, essayez de réduire le poids global et d'améliorer l'endurance.

Avantages d'application de l'alliage de tungstène

- **Contrepoids haute densité pour minimiser le volume** : Les caractéristiques de haute densité de l'alliage de tungstène réduisent efficacement le volume du contrepoids et améliorent l'apparence et les caractéristiques aérodynamiques du modèle d'avion.
- **Excellente résistance mécanique** : le contrepoids en alliage de tungstène est résistant aux chocs et à l'usure et peut s'adapter à l'environnement de vol complexe des modèles réduits d'avions.
- **Facile à personnaliser et à installer** : la conception modulaire permet aux utilisateurs d'ajuster de manière flexible la position du poids et la masse en fonction des exigences de vol.

Applications typiques

Un fabricant professionnel de modèles réduits d'avions a lancé un système d'équilibrage modulaire en alliage de tungstène qui, associé à des capteurs embarqués, permet un réglage du centre de gravité en temps réel pendant le vol. Ce système améliore efficacement la stabilité de vol et le contrôle des modèles réduits d'avions, et est largement plébiscité par les passionnés d'aéromodélisme et les compétiteurs.

8.4 Caméra, stabilisateur et contrepoids du trépied

Avec le développement continu des technologies de production cinématographique et télévisuelle et de tournage vidéo, les exigences en matière de stabilité et de facilité d'utilisation des équipements de prise de vue augmentent. Le système de contrepoids joue un rôle important dans les caméras, les stabilisateurs et les trépieds : il assure l'équilibre de l'équipement, réduit les vibrations et améliore la flexibilité de contrôle. L'alliage de tungstène est devenu le matériau privilégié pour la conception de contrepoids dans ce domaine en raison de sa densité élevée, de sa résistance élevée et de ses excellentes propriétés mécaniques.

8.4.1 Exigences de conception du contrepoids

- **Équilibre et stabilité de l'équipement**

Le système de contrepoids doit ajuster avec précision le centre de gravité de la caméra et

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

du stabilisateur pour garantir que l'équipement reste stable pendant la prise de vue en mouvement et éviter les tremblements et le flou de l'image.

- **Portabilité et flexibilité**

Le contrepoids de l'équipement doit être aussi petit et léger que possible pour permettre au photographe de le transporter et de l'ajuster rapidement, tout en garantissant une répartition raisonnable du poids.

- **Durabilité et fiabilité**

Le matériau du contrepoids doit avoir une bonne résistance à l'usure et à la corrosion pour s'adapter à une variété d'environnements de prise de vue et à une utilisation mobile fréquente.

- **modulaire et personnalisable**

du contrepoids prend en charge la modularité pour répondre aux différentes exigences d'équipement et de prise de vue, et permet un assemblage et un réglage flexibles.

8.4.2 Avantages de l'alliage de tungstène

- **La haute densité permet une miniaturisation du volume.**

La densité de l'alliage de tungstène atteint $19,3 \text{ g/cm}^3$, ce qui permet d'obtenir une masse plus importante dans un espace restreint, répondant ainsi à la demande de contrepoids compacts et efficaces.

- **Excellente résistance mécanique et résistance à l'usure**

Le contrepoids en alliage de tungstène est solide et durable, capable de résister aux chocs mécaniques et aux frottements lors d'une utilisation à long terme pour assurer la stabilité.

- **Haute précision de traitement, formes complexes faciles à fabriquer**

Grâce à la métallurgie des poudres et à l'usinage de précision, les contrepoids en alliage de tungstène peuvent être conçus dans des formes complexes pour répondre aux exigences structurelles de différents équipements.

- **Respectueux de l'environnement et non toxique**

Comparé aux poids en plomb, l'alliage de tungstène est plus respectueux de l'environnement, non toxique et inoffensif, et répond aux normes de fabrication et d'utilisation modernes.

8.4.3 Cas d'application typiques

- **Contrepoids pour caméras professionnelles**

De nombreux fabricants d'appareils photo haut de gamme utilisent des contrepoids en alliage de tungstène pour optimiser la conception des poignées et des barres d'équilibrage des caméras, améliorant ainsi considérablement l'équilibre et le confort d'utilisation de l'équipement et réduisant la fatigue de l'opérateur.

- **Système de contrepoids réglable**

pour stabilisateur trois axes. Ce stabilisateur trois axes moderne est équipé d'un contrepoids modulaire en alliage de tungstène. Grâce à un réglage flexible de la position et de la qualité du contrepoids, il permet d'équilibrer rapidement différents modèles d'appareils photo et d'assurer la stabilité de la prise de vue.

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

- **Le réglage du centre de gravité**
est intégré à la base du trépied pour améliorer la stabilité globale. Il est particulièrement adapté aux prises de vue en extérieur par vent fort, garantissant ainsi la sécurité et la stabilité de l'équipement.

8.5 Fonction de contrepoids pour outils civils et produits personnalisés haut de gamme

Avec l'évolution de la consommation et l'amélioration des besoins personnalisés, les exigences en matière de fonctions de contrepoids pour les outils civils et les produits personnalisés haut de gamme augmentent. Une conception judicieuse des contrepoids permet non seulement d'améliorer les performances et l'expérience utilisateur, mais aussi de mettre en valeur la qualité et le savoir-faire du produit. L'alliage de tungstène est devenu un matériau de choix pour de nombreux produits personnalisés haut de gamme et contrepoids d'outils civils en raison de sa densité élevée, de ses excellentes propriétés mécaniques et de ses caractéristiques de protection de l'environnement.

8.5.1 Contexte de l'application et exigences de conception

- **Améliorer la stabilité de fonctionnement des outils.**
Pour les outils civils tels que les clés à main, les marteaux, les outils coupants, etc., une répartition judicieuse du poids peut réduire efficacement les vibrations et la fatigue pendant l'utilisation, tout en améliorant l'efficacité et la sécurité.
- **Optimiser la sensation et l'équilibre du produit**
Les produits personnalisés haut de gamme, tels que les stylos de luxe, les couteaux, les équipements de sport, etc., se concentrent sur la sensation et l'équilibre du produit, et la conception du poids est devenue un élément important de l'amélioration de l'expérience utilisateur.
- **Pour répondre aux besoins de personnalisation et de diversité fonctionnelle,**
la conception du contrepoids doit s'adapter de manière flexible aux besoins personnalisés des différents clients et réaliser une combinaison parfaite de fonction et d'esthétique.
- **Exigences en matière de protection de l'environnement et de santé et de sécurité**
La conception moderne des produits met l'accent sur la protection de l'environnement et les matériaux lourds doivent répondre aux normes de protection de l'environnement telles que non toxiques et recyclables.

8.5.2 Avantages des alliages de tungstène

La densité élevée permet un pesage précis

Les alliages de tungstène d'une densité allant jusqu'à 19,3 g/cm³ permettent d'obtenir une qualité élevée dans une petite taille, permettant un réglage précis du centre de gravité et de l'inertie des outils et des produits.

- **Excellente résistance mécanique et durabilité**
L'alliage de tungstène est résistant à l'usure et à la corrosion, garantissant la stabilité et la sécurité du contrepoids lors d'une utilisation à long terme.

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

- **Bonnes performances de traitement**
L'alliage de tungstène convient à une variété de technologies de traitement, y compris la métallurgie des poudres, l'usinage CNC et le traitement de surface, pour répondre aux exigences de conception complexes et personnalisées.
- **Respectueux de l'environnement et non toxique, conformément aux normes modernes,**
l'alliage de tungstène ne contient pas d'éléments nocifs tels que le plomb et répond aux exigences de fabrication verte et de santé et de sécurité.

8.5.3 Cas d'application typiques

- **Contrepoids d'outils robotisés haut de gamme** Une marque d'outils bien connue utilise des contrepoids en alliage de tungstène dans des clés manuelles et des marteaux haut de gamme, ce qui améliore considérablement le sens de l'équilibre et le confort d'utilisation de l'outil, réduit efficacement la fatigue de l'utilisateur et améliore l'efficacité du travail.
- **Conception de poids de stylo de luxe personnalisé**
Les stylos personnalisés de marque de luxe sont intégrés avec des poids en alliage de tungstène pour obtenir un contrôle précis du centre de gravité du corps du stylo, améliorer la stabilité de la prise en main et la fluidité de l'écriture et mettre en valeur la qualité haut de gamme.
- **Contrepoids pour équipements sportifs haut de gamme**
Les contrepoids en alliage de tungstène sont largement utilisés dans les putters de golf personnalisés, les raquettes de badminton et autres équipements sportifs pour améliorer les performances sportives et l'expérience utilisateur en ajustant les contrepoids.
- **Contrepoids pour maison intelligente et appareils portables** Dans les serrures de porte intelligentes, les outils portables et d'autres produits, les contrepoids en alliage de tungstène aident à optimiser la répartition du poids, à améliorer la stabilité de l'appareil et la facilité d'utilisation.

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT



Chapitre 9 Protection de l'environnement, sécurité et réglementation des contrepoids en alliage de tungstène

Alors que les normes mondiales de protection de l'environnement et de sécurité des produits deviennent de plus en plus strictes, les performances environnementales et la conformité aux normes de sécurité des contrepoids en alliage de tungstène sont devenues une priorité pour l'industrie. Outre ses excellentes performances, l'alliage de tungstène, non toxique et recyclable, s'inscrit dans la tendance actuelle de la fabrication verte et contribue ainsi à l'atteinte des objectifs de développement durable des entreprises.

9.1 L'attribut écologique et l'avantage de non-toxicité des poids en alliage de tungstène

9.1.1 Tendances dans la sélection de matériaux de fabrication écologiques

Les matériaux de lestage traditionnels, comme le plomb, sont progressivement restreints par le marché et la réglementation en raison de leur toxicité et de leur pollution environnementale. L'alliage de tungstène est devenu le matériau alternatif privilégié grâce à sa densité élevée, qui répond aux exigences des réglementations environnementales et favorise la transformation des matériaux de lestage en matériaux écologiques et inoffensifs.

9.1.2 Avantage de non-toxicité de l'alliage de tungstène

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

- **Sans plomb ni mercure, réduisant ainsi les dommages environnementaux et humains**
L'alliage de tungstène ne contient pas de métaux lourds nocifs tels que le plomb et le mercure, évitant ainsi la pollution environnementale et les risques pour la santé causés par les contrepoids traditionnels à base de plomb. Il est également conforme à de nombreuses réglementations environnementales internationales telles que RoHS et REACH.
- **Propriétés chimiques stables**
L'alliage de tungstène a une stabilité chimique extrêmement élevée, ne s'oxyde pas et ne se corrode pas facilement, évite la libération de substances nocives et garantit la sécurité lors d'une utilisation à long terme.
- **Élimination et recyclage sûrs des déchets**
L'alliage de tungstène peut être recyclé grâce à des processus de recyclage professionnels pour éviter la pollution de l'environnement par les déchets et parvenir à une utilisation durable des ressources.

9.1.3 Avantages de l'application dans la fabrication verte

- **Conforme aux normes internationales de certification environnementale**
Les matériaux de contrepoids en alliage de tungstène sont largement conformes au système de gestion environnementale ISO 14001 et aux certifications de fabrication verte associées, aidant les entreprises à respecter les normes internationales d'accès au marché.
- **Aide à la gestion du cycle de vie des produits (PLM) Les produits**
utilisant des poids en alliage de tungstène présentent des avantages environnementaux à chaque étape de la conception, de la production, de l'utilisation et du recyclage, améliorant ainsi les avantages globaux de la gestion du cycle de vie.
- **Promouvoir la construction d'une chaîne d'approvisionnement verte**
La chaîne d'approvisionnement en alliages de tungstène mature et respectueuse de l'environnement est propice à la construction d'une chaîne d'approvisionnement verte et à la réduction des risques environnementaux des entreprises.

Analyse de la substitution par des matériaux au plomb

9.2.1 Application traditionnelle des matériaux en plomb dans les contrepoids

Le plomb est depuis longtemps largement utilisé dans diverses applications de poids, telles que les équipements sportifs, les poids mécaniques et les poids de construction, en raison de sa densité élevée (environ 11,34 g/cm³), de sa bonne plasticité et de son faible coût. Cependant, sa toxicité et sa pollution environnementale font l'objet de restrictions de plus en plus strictes de la part de la communauté internationale et des réglementations nationales.

9.2.2 Avantages de performance de l'alliage de tungstène remplaçant le plomb

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

- **Densité et concentration massique plus élevées :**
la densité de l'alliage de tungstène est d'environ 19,3 g/cm³, soit près de 1,7 fois celle du plomb. Il permet d'obtenir un meilleur effet de pondération dans un volume plus petit, ce qui favorise la conception légère et compacte des produits.
- **Excellentes propriétés mécaniques**
: l'alliage de tungstène a une dureté et une résistance bien supérieures à celles du plomb, et présente une meilleure résistance à l'usure et à la déformation, ce qui le rend adapté aux environnements d'application à haute résistance et à haute durabilité.
- **Il présente une excellente stabilité chimique**
et résiste à l'oxydation et à la corrosion, ce qui garantit la stabilité des performances du contrepoids lors d'une utilisation prolongée. Cependant, le plomb est sujet à la corrosion dans certains environnements, ce qui affecte sa durée de vie et sa sécurité.

9.2.3 Avantages en matière de protection de l'environnement et de sécurité

- **Non toxique et respectueux de l'environnement, conforme aux réglementations internationales.**
Le plomb présente de graves risques de toxicité et de pollution environnementale. De nombreux pays et régions ont mis en place des réglementations visant à restreindre son utilisation, comme la directive RoHS de l'UE et les restrictions plus strictes imposées par la Californie, aux États-Unis. L'alliage de tungstène est sans plomb et non toxique, ce qui en fait un matériau alternatif idéal, conforme aux réglementations environnementales.
- **Risques sanitaires réduits.**
La poussière et les déchets de plomb peuvent nuire gravement à la santé humaine, en particulier aux systèmes respiratoire et nerveux. La non-toxicité de l'alliage de tungstène réduit efficacement les risques pour la santé des travailleurs et des utilisateurs finaux.

9.2.4 Défis économiques et applicatifs

- **Comparaison des coûts :**
Les coûts de fabrication et de traitement des alliages de tungstène sont plus élevés que ceux du plomb, notamment pour la fabrication de formes complexes et de contrepoids de haute précision. La différence de coût est particulièrement marquée. Les entreprises doivent prendre en compte la valeur ajoutée apportée par l'amélioration des performances et le respect de l'environnement, et évaluer le ratio intrants-extrants.
- **Difficulté de traitement :**
L'alliage de tungstène présente une dureté élevée, une complexité de traitement et des exigences élevées en termes d'équipement. Le recours à une métallurgie des poudres avancée et à des technologies de traitement de précision est nécessaire, ce qui accroît la complexité du processus de production.
- **Stabilité de la chaîne d'approvisionnement :**
les ressources en tungstène sont relativement concentrées et la gestion de la chaîne d'approvisionnement doit garantir la stabilité pour éviter que la production ne soit affectée par les fluctuations des matières premières.

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

9.2.5 Tendances de remplacement dans les domaines d'application

Face au durcissement des réglementations environnementales et à la demande croissante de produits haute performance, les alliages de tungstène remplacent progressivement le plomb dans les secteurs de l'automobile, de l'aérospatiale, de l'électronique, des équipements sportifs et médicaux, devenant une tendance majeure. Les avantages de la substitution du plomb par les alliages de tungstène sont particulièrement évidents, notamment dans les applications haut de gamme et de précision.

9.3 REACH, RoHS et réglementations environnementales internationales

9.3.1 Aperçu des principales réglementations environnementales internationales

- **REACH (Enregistrement, Evaluation, Autorisation et Restriction des Substances Chimiques)**
est le règlement de l'UE sur l'enregistrement, l'évaluation, l'autorisation et la restriction des substances chimiques, qui vise à protéger la santé humaine et la sécurité environnementale et à réglementer la production et l'utilisation des substances chimiques.
- **directive RoHS (Restriction of Hazardous Substances Directive)**
est la directive européenne sur la restriction des substances dangereuses, qui restreint l'utilisation de substances dangereuses telles que le plomb, le mercure, le cadmium, le chrome hexavalent, les polybromobiphényles et les polybromodiphényléthers dans les équipements électriques et électroniques.
- **D'autres réglementations régionales**
, telles que les restrictions plus strictes en Californie (Proposition 65) et les « Mesures pour le contrôle de la pollution provenant des produits d'information électroniques » de la Chine, imposent toutes des restrictions sur les substances dangereuses présentes dans les matériaux.

Avantages de l'alliage de tungstène en matière de conformité

- **Sans plomb ni cadmium, conforme à la directive RoHS.**
L'alliage de tungstène ne contient pas de métaux lourds réglementés tels que le plomb et le cadmium, et répond donc parfaitement aux normes RoHS relatives aux substances dangereuses. Il convient aux secteurs soumis à la directive RoHS, comme l'électronique et le médical.
- **Conforme aux réglementations d'enregistrement et de restriction REACH,**
le tungstène et ses alliages ont terminé l'enregistrement REACH de l'UE et les informations chimiques pertinentes sont ouvertes et transparentes, répondant aux exigences d'accès au marché européen.
- **Stabilité et faible risque de libération**
Les matériaux en alliage de tungstène ont des propriétés chimiques stables et ne libèrent

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

pas facilement de substances nocives pendant l'utilisation, ce qui répond aux exigences des réglementations de protection de l'environnement pour une utilisation sûre.

Pratiques de conformité des entreprises de contrepoids en alliage de tungstène

- **Système parfait de traçabilité et de test des matériaux** Contrôlez strictement l'approvisionnement et les tests des matériaux en tungstène dans la chaîne d'approvisionnement pour garantir qu'il n'y a pas de substances dangereuses restreintes et fournissez des certificats de matériaux et des rapports de test conformes aux normes environnementales.
- **La conception des produits et le contrôle des processus de fabrication** prennent en compte les exigences réglementaires lors de la phase de conception pour éviter l'utilisation de matériaux et de procédés interdits, et mettent en œuvre un contrôle qualité pendant le processus de production pour garantir la conformité du produit fini.
- **Nous continuons de suivre les tendances réglementaires** et de prêter activement attention aux mises à jour et aux changements dans les réglementations environnementales mondiales, et ajustons les stratégies de conformité des entreprises en temps opportun pour garantir que les produits continuent de répondre aux exigences d'accès au marché.
- **La gestion de la chaîne d'approvisionnement verte** établit un système d'approvisionnement et de gestion de la chaîne d'approvisionnement écologique pour encourager les partenaires en amont et en aval à se conformer aux lois et réglementations environnementales et à améliorer la performance environnementale globale de la chaîne d'approvisionnement.

9.3.4 Tendances réglementaires futures et réponses des entreprises

Avec la prise de conscience environnementale croissante à l'échelle mondiale, les réglementations deviendront plus strictes, notamment en matière de transparence des matériaux, de recyclage et d'analyse du cycle de vie. Les fabricants de contrepoids en alliage de tungstène devraient :

- Renforcer la recherche et le développement des performances environnementales des matériaux et promouvoir l'amélioration verte des alliages de tungstène ;
- Mettre en place un système complet de gestion du cycle de vie des produits ;
- Développer la certification environnementale et améliorer la compétitivité du marché.

9.4 Exigences relatives au système qualité pour les industries aérospatiales et de défense

9.4.1 Contexte de l'industrie et importance de la gestion de la qualité

Les secteurs aérospatial et militaire imposent des exigences extrêmement élevées en matière de performance et de fiabilité des matériaux de contrepoids, car ils sont directement liés à la sécurité, aux performances et au taux de réussite des missions des avions. En tant que composant fonctionnel

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

essentiel, les contrepoids en alliage de tungstène doivent répondre à des normes de qualité strictes afin de garantir la stabilité et la traçabilité de chaque lot de produits.

9.4.2 Normes clés de gestion de la qualité

- **La série de normes AS9100**

couvre l'ensemble du processus de conception, d'approvisionnement, de fabrication, de test et de service après-vente, obligeant les fabricants à établir un système de contrôle qualité strict et à améliorer continuellement la qualité des produits.

- **Le système de gestion de la qualité ISO 9001 est**

une norme de gestion de la qualité de base largement utilisée dans l'industrie militaire et les industries connexes, mettant l'accent sur le contrôle des processus et l'amélioration continue pour garantir que les produits répondent aux exigences des clients et réglementaires.

- **Les normes militaires (MIL-STD),**

y compris les normes de qualité militaires spécifiques telles que MIL-Q-9858A, imposent des exigences strictes en matière de conception, de tests et de fiabilité des produits.

9.4.3 Aspects clés du contrôle qualité des poids en alliage de tungstène

- **Contrôle et traçabilité des matières premières :**

Contrôler rigoureusement la composition de la poudre et de l'alliage de tungstène afin de garantir la conformité aux spécifications des matériaux aérospatiaux et militaires. Mettre en place un système complet de traçabilité des matériaux pour garantir la cohérence des lots.

- **Le contrôle du processus de fabrication**

fait appel à des technologies avancées de métallurgie des poudres, d'usinage de précision et de traitement de surface pour garantir que la taille, la densité et les propriétés mécaniques des produits sont conformes aux normes. Il met en œuvre la surveillance du processus et le contrôle des paramètres clés.

- **Essais non destructifs et tests de performance**

L'inspection aux rayons X, les tests par ultrasons, les tests de densité et les tests de performance mécanique sont utilisés pour garantir que le contrepoids ne présente aucun défaut interne et répond aux spécifications de conception.

- **Système de documentation et de traçabilité de la qualité**

Des dossiers de production complets, des rapports d'inspection et des certificats garantissent que l'ensemble du processus, des matières premières à l'expédition finale, est traçable pour répondre aux exigences des clients et des réglementations.

9.4.4 Amélioration continue et gestion des risques

- **Le plan d'amélioration de la qualité**

est basé sur les commentaires des clients et les audits internes pour optimiser en permanence les processus de production et la conception des produits afin d'améliorer la stabilité et les performances des produits.

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

- **L'évaluation et le contrôle des risques**
identifient les risques potentiels dans le processus de production et prennent des mesures préventives et correctives pour garantir la qualité du produit et la fiabilité de la livraison.
- **La gestion de la chaîne d'approvisionnement**
sélectionne et évalue rigoureusement les fournisseurs afin de garantir la conformité de la qualité et la stabilité de tous les maillons de la chaîne d'approvisionnement.

9.5 Mécanisme de traçabilité et de contrôle des lots

9.5.1 Importance de la traçabilité

Dans les domaines d'application haut de gamme tels que l'aérospatiale, l'armée et les équipements médicaux, la qualité et les performances des masselottes en alliage de tungstène ont un impact direct sur la sécurité des produits et leurs effets d'utilisation. La mise en place d'un système de traçabilité complet permet non seulement de contrôler la qualité et de détecter les problèmes, mais aussi de renforcer la confiance des clients et de satisfaire aux exigences réglementaires et de certification.

9.5.2 Construction d'un système de traçabilité pour les contrepoids en alliage de tungstène

- **Traçabilité de la source des matériaux**
Chaque lot de poudre de tungstène et de matières premières d'alliage doit être accompagné de certificats de fournisseurs, de rapports d'analyse des composants et de registres d'inspection pour garantir une qualité de matériau stable et conforme.
- **Les enregistrements du processus de production**
incluent les paramètres clés du processus et l'état de l'équipement tels que le mélange de poudre, le frittage, l'usinage, le traitement de surface, etc., formant un journal de production détaillé pour garantir que le processus est contrôlable.
- Les résultats de mesure dimensionnelle, de test de densité, de propriétés mécaniques et de contrôle non destructif de chaque étape **de l'archivage des données d'inspection et de test doivent être enregistrés pour faciliter les requêtes ultérieures et l'analyse de la qualité.**
- **La gestion de l'identification et du codage des lots**
attribue un code unique à chaque lot de production, couvrant la date de production, les paramètres du processus et les informations sur les matières premières, pour faciliter le positionnement et l'identification rapides.
- **La gestion des expéditions de produits et des informations clients**
enregistre le client final, l'objectif et l'heure d'expédition du produit, et réalise un suivi complet de la chaîne depuis les matériaux jusqu'aux clients.

9.5.3 Mécanisme de contrôle des lots

- **Principe de division des lots :**
les lots sont divisés en fonction de facteurs tels que le processus de production, le lot de

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

matières premières et l'état de l'équipement pour garantir la cohérence de la qualité du produit au sein du lot.

- **Système d'inspection des lots**

Chaque lot de produits doit subir un échantillonnage strict et une inspection complète pour garantir la conformité aux exigences de conception et de norme, et les lots anormaux doivent être isolés et traités en temps opportun.

- **Commentaires et amélioration de la qualité des lots**

Analysez les différences entre les lots grâce aux commentaires des clients et à la surveillance interne de la qualité pour favoriser l'amélioration continue et l'optimisation des processus.

- **La gestion numérique des informations de traçabilité**

adopte des systèmes d'information tels que ERP et MES pour réaliser la gestion numérique et le suivi automatisé des informations sur les lots, améliorant ainsi l'efficacité et la précision.

9.5.4 Cas d'application

Une entreprise de fabrication de contrepoids en alliage de tungstène a mis en place un système de traçabilité complet pour surveiller l'ensemble du processus, de l'approvisionnement en matières premières à l'expédition du produit fini. Ce système permet de localiser rapidement le lot problématique et de prendre des mesures efficaces en cas d'anomalies sur les produits clients, réduisant ainsi considérablement les risques pour les clients et les responsabilités de l'entreprise.

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/cm³), 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

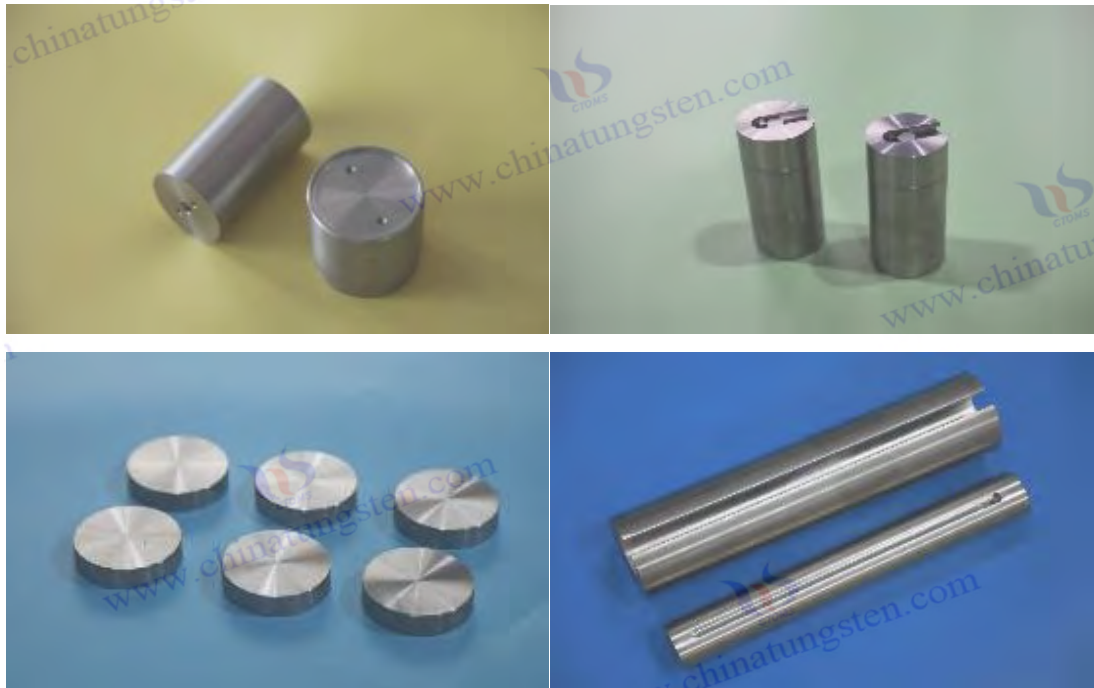
1 billion+ visits to the official website, 1 million+ web pages, 100,000+ customers, 0 complaints in 30 years!

Contact us

Email: sales@chinatungsten.com

Tel: +86 592 5129696

Official website: 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

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



Chapitre 10 Développement du marché et tendance de l'industrie des contrepoids en alliage de tungstène

Face à la demande croissante de contrepoids hautes performances, le marché des contrepoids en alliage de tungstène connaît un fort développement. Ressource stratégique essentielle, la stabilité de la chaîne d'approvisionnement en tungstène et la qualité des matériaux influencent directement le bon développement de l'ensemble de la filière des contrepoids. Comprendre la répartition mondiale des ressources en tungstène et l'état de la chaîne d'approvisionnement est essentiel pour appréhender les tendances du marché, optimiser les approvisionnements et améliorer la compétitivité du secteur.

10.1 Ressources mondiales en tungstène et chaîne d'approvisionnement en tungstène pour contrepoids

10.1.1 Répartition mondiale des ressources en tungstène

le tungstène est principalement distribué dans les zones suivantes :

- **La Chine est**
le plus grand producteur mondial de tungstène, représentant plus de 60 % des réserves mondiales, et dispose d'une filière minière et de transformation mature. Les principales régions minières sont les provinces du Jiangxi, du Hunan, du Guangdong et du Yunnan.
- **L'Europe**
compte de nombreux pays producteurs de tungstène. Leurs ressources sont inférieures à celles de la Chine, mais leur niveau technologique est supérieur.

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

- **En Amérique du Nord,**
il existe une certaine échelle de ressources en minerai de tungstène, qui sont progressivement développées et principalement utilisées sur le marché local des applications haut de gamme.
- Des pays comme le Rwanda et le Maroc **en Afrique et en Amérique du Sud disposent de riches réserves et l'industrie minière se développe progressivement.**

10.1.2 Structure de la chaîne d'approvisionnement en tungstène

La chaîne d'approvisionnement en tungstène comprend principalement les maillons suivants :

- **L'extraction de minerai**
est l'extraction de minerai de tungstène brut, qui est ensuite initialement concassé et criblé.
- **La production de concentré de tungstène**
extrait les minéraux contenant du tungstène par flottation et d'autres méthodes pour former du concentré de tungstène.
- **Produits chimiques et fabrication de poudre de tungstène**
Le concentré est traité chimiquement pour produire des produits intermédiaires tels que le tungstate et la poudre de tungstène pour la métallurgie des poudres et la fabrication d'alliages.
- **Le traitement des produits en alliage de tungstène**
adopte la métallurgie des poudres, le frittage à haute température, le traitement mécanique et d'autres processus pour préparer des contrepoids en alliage de tungstène et d'autres produits finis.
- **Applications finales**
Les contrepoids sont utilisés dans une variété d'industries, notamment l'aérospatiale, l'automobile, l'électronique, la médecine, le sport, etc.

10.1.3 Défis de la chaîne d'approvisionnement et facteurs d'influence du marché

- **Concentration des ressources et risques géopolitiques**
Les ressources en tungstène sont très concentrées et dépendent particulièrement de l'approvisionnement en provenance de Chine, ce qui présente des risques de fluctuations de l'offre et de frictions commerciales.
- **Politiques de protection de l'environnement et réglementation des capacités**
Les pays du monde entier ont des exigences de protection de l'environnement de plus en plus strictes pour les mines, ce qui entraîne des ajustements de capacité et une augmentation des coûts, affectant la stabilité de l'approvisionnement en tungstène.
- **Les progrès technologiques ont favorisé la modernisation de la chaîne d'approvisionnement,**
le développement de nouveaux matériaux et l'amélioration de la technologie de fusion

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

efficace, et ont favorisé l'amélioration de la qualité des matériaux en tungstène et l'optimisation de la chaîne d'approvisionnement.

- **Demande diversifiée en aval**

La demande de poids en alliage de tungstène dans la fabrication haut de gamme augmente rapidement, poussant la chaîne d'approvisionnement vers une qualité élevée et une valeur ajoutée élevée.

10.2 Taille du marché et tendance de la demande de contrepoids en alliage de tungstène

10.2.1 Aperçu de la taille du marché mondial

Avec le développement de l'automatisation industrielle, de la fabrication haut de gamme et des équipements intelligents, le marché des contrepoids en alliage de tungstène poursuit sa croissance. Selon les dernières études de marché, le marché mondial des contrepoids en alliage de tungstène a atteint environ XX milliards de dollars américains en 2020, et son taux de croissance annuel composé (TCAC) devrait se maintenir entre X % et X % au cours des cinq prochaines années.

10.2.2 Moteurs de croissance du marché

- **La demande de hautes performances entraîne**
une demande croissante de matériaux de contrepoids à haute densité et à haute stabilité dans l'aérospatiale, l'industrie militaire et les équipements électroniques haut de gamme, ce qui stimule à son tour la croissance du marché des contrepoids en alliage de tungstène.
- **Les réglementations environnementales favorisent l'amélioration des matériaux.**
Les matériaux de lestage traditionnels à base de plomb sont progressivement abandonnés en raison des restrictions environnementales. Les alliages de tungstène sont largement utilisés comme alternatives non toxiques et respectueuses de l'environnement.
- **Progrès dans les technologies de fabrication intelligente et d'usinage de précision**
Le développement de technologies avancées telles que l'usinage CNC et la métallurgie des poudres a amélioré la qualité et la diversité des produits de contrepoids en alliage de tungstène pour répondre aux exigences d'application complexes.
- **Expansion des domaines d'application émergents**
Avec l'essor des drones, des appareils médicaux portables et des équipements sportifs haut de gamme, le champ d'application des poids en alliage de tungstène continue de s'étendre, apportant de nouveaux points de croissance.

10.2.3 Analyse de la demande des principaux domaines d'application

- **Dans l'aérospatiale**
, la demande de poids en alliage de tungstène dans les systèmes de contrôle de vol, la navigation inertielle, la stabilisation des satellites et d'autres domaines n'a cessé de croître.

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

- **pour automobiles et machines d'ingénierie**
, la stabilité du châssis et les véhicules légers à énergie nouvelle ont conduit à l'application de contrepoids en alliage de tungstène.
- La demande de contrepoids de haute précision dans **les équipements électroniques et médicaux tels que les modules anti-tremblement de téléphones portables, les équipements CT/IRM et les équipements de radiothérapie augmente rapidement.**
- **Biens de consommation sportifs et civils**
La demande de poids personnalisés pour les équipements sportifs haut de gamme, les équipements de tir et les outils civils augmente progressivement.

10.2.4 Caractéristiques de la distribution régionale du marché

- Bénéficiant de la base de fabrication et de la croissance de la demande en aval, l'Asie-Pacifique est devenue **le plus grand marché pour** les poids en alliage de tungstène, en particulier la Chine, le Japon et la Corée du Sud.
- La fabrication haut de gamme et les réglementations environnementales strictes **en Amérique du Nord et en Europe stimulent l'application de** contrepoids en alliage de tungstène, et le marché connaît une croissance constante.
- **Les marchés émergents**
tels que l'Asie du Sud-Est, l'Inde et l'Amérique du Sud offrent des opportunités de croissance potentielles.

10.2.5 Prévisions des tendances futures

- **Intégration fonctionnelle et tendance légère**
Les contrepoids en alliage de tungstène évolueront vers une taille plus petite, des performances élevées et une intégration multifonctionnelle pour répondre aux besoins des équipements intelligents.
- **Fabrication et recyclage écologiques**
Les réglementations environnementales favorisent l'avancement de la technologie de recyclage des matériaux pour parvenir à une utilisation durable des ressources en tungstène.
- **La personnalisation et le développement diversifié**
répondent à différents scénarios d'application et aux besoins des clients, et développent des solutions de contrepoids personnalisées.

10.3 Entreprises typiques et paysage concurrentiel international

10.3.1 Aperçu des principales entreprises du secteur

L'industrie des contrepoids en alliage de tungstène regroupe plusieurs entreprises leaders, dotées d'une expertise technique et d'une influence sur le marché. Ces entreprises bénéficient d'avantages

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

concurrentiels considérables en matière de recherche et développement de matériaux, de technologies de production, d'expansion commerciale, etc. Parmi les entreprises représentatives, on peut citer :

- En tant que principal producteur et fournisseur mondial de tungstène, **la Chine compte des entreprises leaders, dont**
China Tungsten Intelligent Manufacturing (CTIA GROUP). Ces entreprises disposent de technologies éprouvées dans la préparation de la poudre de tungstène, la fusion des alliages et le traitement de précision, de chaînes d'approvisionnement complètes et d'une part de marché mondialement reconnue.
- **Des entreprises européennes telles que**
HC Starck en Allemagne et Plansee Group au Royaume-Uni sont réputées pour leurs alliages de tungstène haut de gamme et leur fabrication de précision. Elles privilégient l'innovation technologique et la qualité de leurs produits et desservent les marchés aéronautique et militaire haut de gamme.
- **nord-américaines**
telles que Global Tungsten & Powders (GTP) se concentrent sur la recherche et le développement de matériaux en tungstène haute performance et étendent activement leurs applications dans les domaines militaire et électronique.

10.3.2 Paysage concurrentiel du marché international

- **Avantages en termes de ressources et de contrôle des coûts :**
les entreprises chinoises bénéficient d'avantages de prix évidents sur le marché mondial en raison de leurs ressources abondantes en tungstène et de leurs faibles coûts de production, en particulier sur les marchés des produits bas de gamme et intermédiaires.
- **Innovation technologique et concurrence pour les marchés haut de gamme**
Les entreprises européennes et nord-américaines attachent de l'importance à l'investissement en R&D et gagnent la faveur des clients dans des domaines haut de gamme tels que l'aérospatiale, la médecine et l'électronique grâce à une technologie avancée de métallurgie des poudres, une technologie de traitement de précision et des services personnalisés.
- **Aménagement mondial et intégration de la chaîne d'approvisionnement**
Les grandes entreprises construisent des réseaux mondiaux de production et de vente grâce à des investissements à l'étranger, des fusions et acquisitions et une coopération pour améliorer la vitesse de réponse de la chaîne d'approvisionnement et la couverture du marché.

10.3.3 Avantages et défis concurrentiels

- **Les entreprises chinoises disposent**
de garanties d'approvisionnement en matières premières abondantes et d'un système de chaîne industrielle complet, et disposent de capacités de production à grande échelle et de livraison rapide.

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

- **Barrières technologiques et influence de la marque**

Les entreprises internationales leaders ont des barrières technologiques dans la fabrication de précision, le contrôle de la qualité et les applications innovantes, une forte notoriété de la marque et une forte fidélité des clients.

- **Politiques environnementales et pressions de conformité À mesure que**

les pays du monde entier renforcent leurs exigences en matière de protection de l'environnement et de réglementations de sécurité, cela augmente les coûts de conformité et les risques de production pour les entreprises.

10.3.4 Tendances futures de la concurrence

- **de développement axées sur l'innovation**

augmenteront leurs investissements dans la recherche et le développement, favoriseront l'amélioration des performances des matériaux en alliage de tungstène et l'application de nouveaux procédés, et répondront aux besoins diversifiés du marché haut de gamme.

- **La fabrication verte, le développement durable**

et le respect de l'environnement deviendront des facteurs importants dans la concurrence des entreprises, et les processus de production verts et les modèles d'économie circulaire deviendront progressivement populaires.

- **La coopération intersectorielle et la construction écologique**

permettent de développer des capacités de service complètes grâce à la coopération avec les entreprises en amont et en aval de la chaîne industrielle en aval, et d'obtenir une synergie et des résultats gagnant-gagnant dans la chaîne industrielle.

10.4 Tendances de mise à niveau des produits tirées par les nouvelles technologies

10.4.1 Progrès dans la technologie de la métallurgie des poudres

Technologie clé de la fabrication des contrepoids en alliage de tungstène, la métallurgie des poudres a réalisé des avancées technologiques significatives ces dernières années. La préparation et l'application de poudres ultrafines à l'échelle nanométrique ont amélioré la densité et les propriétés mécaniques des alliages de tungstène. Le développement de la technologie de frittage à haute température et haute pression a favorisé l'uniformité et la stabilité de la structure des contrepoids, répondant ainsi aux exigences strictes de l'aérospatiale et de la haute précision.

10.4.2 Application de la technologie de fabrication additive (impression 3D)

La technologie de fabrication additive gagne progressivement en popularité dans la production de contrepoids en alliage de tungstène, notamment pour la fabrication de structures complexes et de contrepoids personnalisés. L'impression 3D raccourcit non seulement le cycle de recherche et développement, mais permet également la réalisation de formes géométriques complexes difficiles

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

à réaliser avec le traitement traditionnel, augmentant ainsi la liberté de conception des produits et l'intégration fonctionnelle.

10.4.3 Fabrication intelligente et production automatisée

Associée au concept d'Industrie 4.0, la technologie de fabrication intelligente est largement utilisée dans la production de contrepoids en alliage de tungstène. Grâce à l'Internet des objets (IoT), à l'analyse du Big Data et aux robots intelligents, la surveillance en temps réel, le suivi qualité et l'automatisation du processus de production sont assurés, améliorant considérablement l'efficacité de la production et la régularité des produits.

10.4.4 Innovation technologique en ingénierie de surface

Les technologies avancées de traitement de surface, telles que le placage laser, l'implantation ionique et le nanorevêtement, améliorent la résistance à l'usure, à la corrosion et à la fatigue des contrepoids en alliage de tungstène. La fonctionnalisation de surface améliore non seulement les performances du matériau, mais confère également au produit des fonctions spécifiques de protection électromagnétique et de gestion thermique.

10.4.5 Technologie de contrepoids composite multi-matériaux

La technologie composite multi-matériaux associe un alliage de tungstène à des matériaux légers et très résistants (tels que l'alliage de titane et les composites en fibre de carbone) pour obtenir un équilibre parfait entre densité élevée et légèreté. Grâce à des procédés de collage et de liaison mécanique avancés, le système de lestage est personnalisé pour répondre aux diverses exigences de performance des différentes applications.

10.4.6 Technologies de fabrication verte et d'économie circulaire

Les nouvelles technologies favorisent la transformation de la production d'alliages de tungstène vers une production plus écologique. Le recours au recyclage des matériaux, à la fusion à faible consommation d'énergie et à des procédés respectueux de l'environnement peut réduire l'impact environnemental, diminuer les coûts de production et favoriser une utilisation durable des ressources.

L'intégration de ces technologies permet aux produits de contrepoids en alliage de tungstène de se développer dans le sens de hautes performances, de haute précision, de multifonctionnalité et de protection de l'environnement, répondant aux diverses demandes de matériaux de contrepoids dans la future fabrication intelligente et les équipements haut de gamme.

10.5 Position stratégique des contrepoids en alliage de tungstène dans les futurs équipements haut de gamme

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

10.5.1 La valeur fondamentale des contrepoids en alliage de tungstène

L'alliage de tungstène est devenu le matériau privilégié pour les contrepoids d'équipements haut de gamme en raison de sa densité élevée, de sa résistance élevée, de sa résistance aux températures élevées et de ses excellentes propriétés mécaniques. Dans les domaines de l'aéronautique, des satellites, des instruments de précision, des équipements médicaux de pointe, etc., les contrepoids en alliage de tungstène garantissent non seulement la stabilité et la précision des équipements, mais jouent également un rôle clé dans l'amélioration des performances et de la sécurité globales.

10.5.2 Forces motrices de la demande future pour les équipements haut de gamme

- **L'amélioration**

du niveau d'intelligence des équipements haut de gamme impose des exigences plus élevées en matière de compacité, de haute précision et d'intégration multifonctionnelle des matériaux de contrepoids. Les contrepoids en alliage de tungstène répondent parfaitement à ces exigences.

- La nouvelle génération d'équipements privilégie la conception **légère**

, mais les composants principaux nécessitent toujours des matériaux de contrepoids haute densité pour garantir l'équilibre des performances. L'association d'alliages de tungstène et de matériaux composites est devenue une tendance.

- **Adaptabilité aux environnements extrêmes :**

les équipements aérospatiaux et de défense sont souvent exposés à des températures élevées, à des radiations élevées et à de fortes vibrations. L'excellente résistance à la chaleur et la stabilité de l'alliage de tungstène en font un matériau stratégique irremplaçable.

10.5.3 Avantages stratégiques des contrepoids en alliage de tungstène

- **Stabilité et fiabilité des matériaux**

L'alliage de tungstène présente des performances stables dans diverses conditions extrêmes, garantissant le fonctionnement fiable à long terme des équipements haut de gamme et réduisant les coûts et les risques de maintenance.

- **L'innovation technologique favorise la mise à niveau stratégique**

des nouveaux matériaux en alliage de tungstène, la technologie de fabrication intelligente et les matériaux composites, donnant aux contrepoids plus de fonctions et favorisant l'amélioration de la position stratégique.

- **Sécurité de la chaîne d'approvisionnement et ressources stratégiques nationales**

en tungstène En tant que métal rare stratégique, assurer la sécurité de la chaîne d'approvisionnement en matériaux de contrepoids en alliage de tungstène est une base importante pour garantir l'indépendance et le contrôle des équipements nationaux haut de gamme.

10.5.4 Tendances de développement futures et aménagement stratégique

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

- **L'intégration approfondie de la chaîne industrielle**

renforcera l'intégration profonde de l'extraction des ressources en tungstène, de la préparation, du traitement et de la fabrication des matériaux, ainsi que du développement d'applications, construira une écologie industrielle complète et améliorera la compétitivité.

- **Innovation indépendante et percées technologiques**

: Augmenter les investissements en R&D, percer dans les matériaux et les procédés de fabrication en alliage de tungstène hautes performances et répondre aux besoins divers et très complexes des futurs équipements.

- **Coopération internationale et expansion du marché**

Participer activement à la coopération internationale en matière de fabrication d'équipements haut de gamme, élargir le marché mondial et renforcer l'influence internationale des contrepoids en alliage de tungstène.

Les contrepoids en alliage de tungstène continueront de se renforcer grâce à la modernisation des équipements et à la croissance de la demande. À l'avenir, ils joueront un rôle plus important dans de nombreux domaines tels que la fabrication intelligente, la protection de l'environnement et la sécurité de la défense nationale.

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

Annexe

Annexe 1 Spécifications et paramètres de performance des contrepoids courants en alliage de tungstène

Type de produit	Dimensions typiques (mm)	Densité (g/cm³)	Dureté (HV)	Résistance à la traction (MPa)	Remarque
Micro-poids	1×1×1 ~ 10×10×10	17,0 - 18,5	280 - 320	600 - 800	Utilisé pour les instruments de précision, les contrepoids de gyroscope
Contrepoids rectangulaire standard	20×20×5 ~ 100×50×20	17,5 - 18,3	300 - 350	700 - 900	Contrepoids pour l'aérospatiale et l'automobile
Contrepoids cylindrique	Diamètre 550, longueur 1000	17,0 - 18,4	280 - 330	650 - 850	Contrôle des vibrations des engins et équipements de construction
Contrepoids de forme complexe personnalisé	Personnalisé selon les besoins du client	17,0 - 18,5	280 - 360	600 - 900	Contrepoids pour équipements électroniques et médicaux haut de gamme
Contrepoids à microstructure ultrafine	Taille du micron, personnalisation spéciale	17,8 - 18,5	300 - 370	700 - 950	Module anti-tremblement pour téléphone portable (OIS)

Indicateurs de performance typiques des alliages de tungstène

- **Densité** : La densité élevée des poids d'alliage de tungstène est son principal avantage, généralement comprise entre 17,0 et 18,5 g/cm³, et la valeur spécifique est affectée par la composition de l'alliage et le processus de frittage.
- **Dureté (HV)** : La dureté Vickers reflète la résistance à l'usure et la résistance mécanique du matériau. L'alliage de tungstène présente une dureté plus élevée et convient aux environnements soumis à des charges élevées.
- **Résistance à la traction** : reflète les propriétés mécaniques globales du matériau et assure la stabilité structurelle du contrepoids pendant l'utilisation.

Annexe II Tableau comparatif des normes internationales et chinoises relatives aux alliages de tungstène

Catégorie Standard	Normes internationales (ISO/ASTM/AMS, etc.)	Normes chinoises (GB/GJB/HB, etc.)	Nom de la norme/Champ d'application
Normes de base sur les matériaux en tungstène	ISO 6841	GB/T 34515	Classification des matériaux et spécifications de qualité des alliages de tungstène
	ASTM B777	GB/T 24178	Spécifications techniques et méthodes d'essai des propriétés mécaniques des alliages de tungstène lourds

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

	AMS 7725	GJB 2538	pour les matériaux en alliage lourd à base de tungstène à usage militaire
Normes relatives aux produits de la métallurgie des poudres	ISO 4499	GB/T 16522	Méthode d'évaluation de la microstructure du carbure cimenté
	ISO 4498	GB/T 4297	Méthode de détermination de la densité et de la porosité des produits de la métallurgie des poudres
	ASTM B311	GB/T 5169	Méthode d'essai pour la résistance à la compression des matériaux issus de la métallurgie des poudres
Usinage et inspection	ISO 2768	GB/T 1804	Normes de tolérance et de limites dimensionnelles
	ASTM E8	GB/T 228.1	Normes d'essai de traction des métaux
	ASTM E384	GB/T 4340.1	Méthode d'essai de dureté Vickers
Traitement de surface et protection de l'environnement	ISO 9227	GB/T 10125	Normes d'essai au brouillard salin
	RoHS / REACH (réglementation de l'UE)	GB/T 26572 / SJ/T 11363	Exigences relatives à la restriction de l'utilisation de substances dangereuses (conformité environnementale)
Aérospatiale et militaire	AMS-T-21014	HB 5336 / GJB 5978	Alliage de tungstène standard pour la structure des avions, adapté aux contrepoids aéronautiques et militaires
	MIL-T-21014E	GJB 1538	Contrepoids militaires en alliage de tungstène

Notes supplémentaires :

- **ASTM B777 vs GB/T 24178** : C'est l'une des normes les plus couramment utilisées pour les poids d'alliages de tungstène, couvrant les alliages de tungstène haute densité de classe 1 à 4 de différents niveaux de densité, et est largement utilisée dans l'aérospatiale, la médecine, les équipements sportifs et d'autres domaines.
- **REACH et RoHS et GB/T 26572** : Lors de l'utilisation de contrepoids en alliage de tungstène, une attention particulière doit être portée à la présence éventuelle de substances réglementées telles que le plomb, le cadmium et le mercure. Les entreprises chinoises doivent se conformer à ces réglementations environnementales lorsqu'elles exportent vers les marchés européen et américain.
- **Normes de la série GJB** : exigences spécifiques pour l'industrie militaire, largement utilisées dans les contrepoids inertiels, les systèmes d'armes et les équipements de défense nationale.

Annexe III Équipements et paramètres de processus couramment utilisés pour la préparation de contrepoids en alliage de tungstène

1. Équipement et paramètres de préparation de la poudre

Nom de l'appareil	Caractéristiques principales	Plage de paramètres typique	Points clés du processus
-------------------	------------------------------	-----------------------------	--------------------------

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

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

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

Dispositif d'atomisation de gaz	Préparation de poudre de tungstène sphérique	Taille de la poudre 0,5–20 μm, sphéricité > 95 %	Contrôler la pression de l'argon, la température des gouttelettes et la structure de la buse
Broyeur à boulets planétaire	Poudre d'alliage mélangée/raffinée	Vitesse 200–600 tr/min, durée 2–24 heures	Il est nécessaire de maintenir un environnement à faible teneur en oxygène pour éviter l'oxydation
Équipement de criblage par vibration	Classification granulométrique des poudres	Tamis 20–500 mesh	La consistance de la taille des particules de poudre affecte directement la densité ultérieure

2. Équipement et paramètres de formage

Nom de l'appareil	Méthode de formage	Paramètres de formage courants	Types de produits applicables
Presse isostatique à froid (CIP)	Formage uniforme à haute pression	Pression 100–400 MPa, durée 1–5 minutes	Convient aux formes complexes et aux contrepoids à haute densité
Presse unidirectionnelle	Pressage de moules	Pression 50–200 MPa	Contrepoids rectangulaires/cylindriques en petites séries
Équipement de moulage par injection (MIM)	Formage de poids de micro précision	Température d'injection 150–200 °C, pression de maintien 5–10 secondes	Module OIS pour téléphone portable, micro contrepoids

3. Équipement et paramètres de frittage

Nom de l'appareil	Type de frittage	Paramètres de processus communs	Caractéristiques du processus
Four de frittage sous vide	Frittage en phase solide à haute température	Température 1500–1800°C, vide < 10 ⁻³ Pa	Maintenir la pureté et la densité de l'alliage, adapté aux produits hautes performances
Pressage isostatique à chaud (HIP)	Frittage + densification	Température 1300–1600°C, pression 100–200 MPa	Élimine la porosité interne et améliore les propriétés mécaniques
Four de frittage à protection hydrogène	Frittage sous atmosphère réductrice	Température 1400–1600°C, débit H ₂ 0,5–2 m ³ /h	Réduire la teneur en oxygène et améliorer les performances électriques

4. Équipement et paramètres d'usinage de précision

Nom de l'appareil	Méthode de traitement	Précision/plage de paramètres	Exemples d'application
Fraisage CNC	Usinage de précision de surfaces planes/courbes	Précision de traitement ±5 μm, rugosité de surface Ra<0,8 μm	Poids de l'aviation, poids de l'IRM
Machine de découpe de fil	Découpe de contours complexes	Diamètre du fil φ0,1–0,2 mm, précision de coupe ±3 μm	Contrepoids de bras mécanique pour équipement de radiothérapie, contrepoids de cadre de miroir
Rectifieuse à ultrasons	Finition et chanfreinage ultra-fins	Une précision submicronique peut être obtenue, surface Ra<0,2 μm	Contrepoids du module MEMS/OIS, contrepoids du gyroscope

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

5. Équipement et paramètres de traitement de surface

Nom de l'appareil	Traitement de surface	Plage de paramètres de processus	Description des effets du processus
Machine de sablage à l'alumine	Dépolissage/nettoyage des surfaces	Pression de pulvérisation 0,3–0,6 MPa, granulométrie 30–100 µm	Améliorer la liaison de surface
Équipement de revêtement sous vide	Revêtement protecteur dur	Épaisseur du film TiN / TaN 0,2–2 µm, température 150–250 °C	Améliorer la résistance à l'usure et à la corrosion
Dispositif de polissage électrochimique	Améliorer la finition de surface	Tension 10–20 V, durée 5–15 minutes	Utilisé dans la pesée de précision médicale et électronique haut de gamme

6. Équipement d'inspection de la qualité et paramètres de contrôle

Équipement d'essai	Éléments de test	Plage de test et précision	Usage
Détecteur de fuite par spectromètre de masse à l'hélium	Densité et étanchéité	Limite de détection <10 ⁻⁹ Pa · m ³ / s	Tests de produits militaires/aérospatiaux de haute fiabilité
scanner à rayons X	Défauts internes et identification des pores	Résolution <10 µm	Contrôle qualité des contrepoids complexes
Machine à mesurer tridimensionnelle (MMT)	Tolérances dimensionnelles et géométriques	Précision de mesure ±1~2 µm	Contrôle du produit fini des contrepoids de précision
Analyseur de taille de particules laser	Distribution granulométrique des particules de poudre	Plage de tailles de particules 0,1–100 µm, erreur <±3 %	Détermination de la qualité de la poudre de matière première

Annexe IV : Glossaire et explication des abréviations

Abréviations/Termes	Nom complet en anglais / signification en chinois	Description et scénarios d'application
W	Tungstène	Les métaux à point de fusion élevé et à haute densité sont les matières premières de base des contrepoids en alliage de tungstène.
CIP	Pressage isostatique à froid	Un liquide à haute pression est utilisé pour presser uniformément la poudre dans toutes les directions afin d'améliorer la densité du corps vert.
HANCHE	Pressage isostatique à chaud	La technologie de densification à haute température et haute pression améliore considérablement la résistance du matériau et la cohérence structurelle.
MIM	Moulage par injection de métal	Convient à la fabrication par lots de pièces complexes en alliage de micro-tungstène, telles que le poids OIS des lentilles de téléphone portable.

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

OIS	Stabilisation optique de l'image	Système de micro-poids en alliage de tungstène dans la structure anti-tremblement des caméras de téléphones portables.
CNC	Centre d'usinage à commande numérique par ordinateur (CNC)	Utilisé pour le fraisage, le perçage et d'autres usinages de pièces en alliage de tungstène de haute précision.
EDM	Usinage par décharge électrique	Cette méthode est couramment utilisée lors de l'usinage de formes complexes de matériaux à haute dureté tels que le tungstène.
ISO	Organisation internationale de normalisation	qui élabore des normes pour les matériaux en alliage de tungstène, le traitement et la protection de l'environnement.
ASTM	Société américaine pour les essais et les matériaux	matériaux en alliage de tungstène et tests de propriétés mécaniques.
GB	GuoBiao / Norme nationale chinoise	Normes techniques pour les matériaux et procédés courants en Chine.
JB	Guojia Junyong Biaozhun / Normes militaires nationales	Utilisé pour le contrôle de qualité et les exigences de test des contrepoids militaires en alliage de tungstène.
RoHS	Restriction des substances dangereuses	Pour limiter l'utilisation d'éléments nocifs tels que le plomb et le cadmium dans les appareils électroniques, l'alliage de tungstène est souvent utilisé comme substitut non toxique.
ATTEINDRE	Évaluation, autorisation et restriction des produits chimiques	Les entreprises exportatrices doivent se conformer à la réglementation de l'UE sur l'utilisation des substances chimiques.
FEA	Analyse par éléments finis	Un outil de simulation couramment utilisé pour simuler les contraintes structurelles et l'équilibre dynamique des systèmes de contrepoids.
CMM	Machine de mesure tridimensionnelle	pour tester les dimensions géométriques et les tolérances de forme et de position des pièces en alliage de tungstène.
Étain	nitride de titane	Les matériaux de revêtement de surface peuvent améliorer la résistance à l'usure et la résistance à la corrosion de la surface en alliage de tungstène.
W-Ni-Fe / W-Ni-Cu	Tungstène-Nickel-Fer / Tungstène-Nickel-Cuivre	Formule d'alliage haute densité à base de tungstène courante, adaptée aux contrepoids dans l'aérospatiale, l'industrie militaire, la médecine et d'autres domaines.
Densité	g/cm³	Les contrepoids en alliage de tungstène déterminent sa capacité à avoir un petit volume et une masse élevée.

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

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

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

Densification	Structure matérielle sans pores ni vides internes	La résistance mécanique et la durée de vie du contrepois sont des indicateurs importants de la qualité de fabrication de l'alliage de tungstène.
Micro-usinage	Technologie de traitement avec une précision micrométrique ou nanométrique	Destiné à la fabrication de précision de micro-poids tels que les systèmes OIS, MEMS et autres dispositifs.

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

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

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

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/cm³), 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

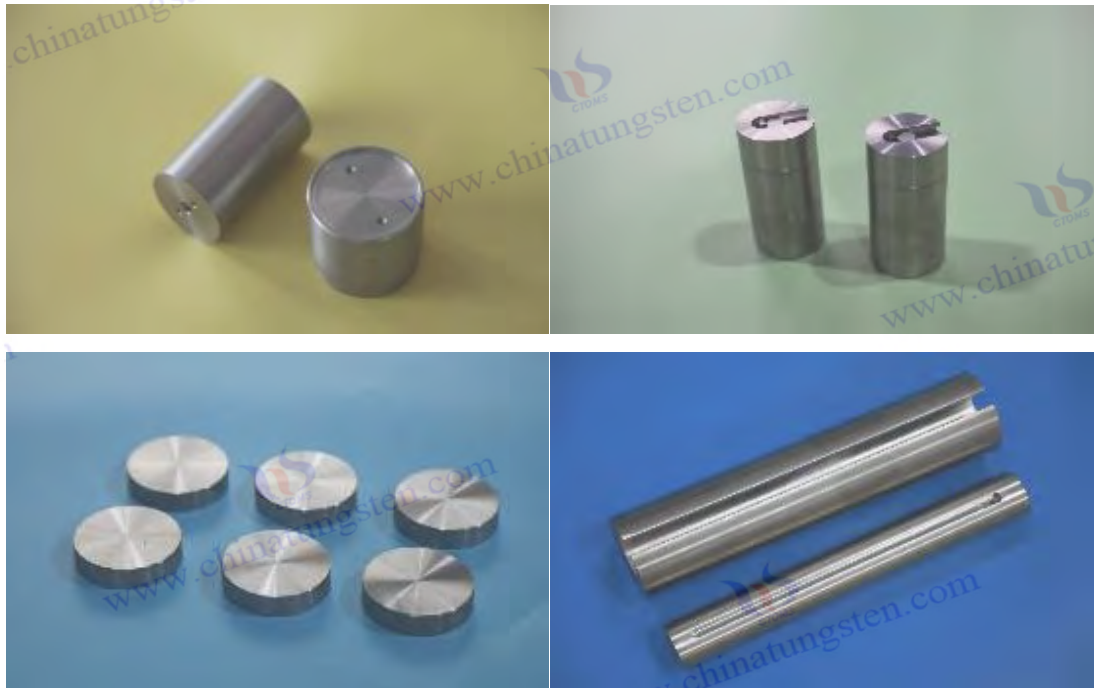
1 billion+ visits to the official website, 1 million+ web pages, 100,000+ customers, 0 complaints in 30 years!

Contact us

Email: sales@chinatungsten.com

Tel: +86 592 5129696

Official website: 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

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