

Qu'est-ce que la feuille de cuivre et de molybdène

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 commerciale mondiale, devenant ainsi un fournisseur de solutions d'application complètes dans les domaines des produits chimiques à base de tungstène, des métaux tungstène, des carbures cémentés, des alliages haute densité, du molybdène et de ses alliages.

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

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

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



COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

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

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

Table des matières

Chapitre 1 Introduction

- 1.1 Présentation de la tôle de cuivre et de molybdène
- 1.2 Composition et structure des matériaux composites molybdène-cuivre
- 1.3 Importance de la feuille de cuivre et de molybdène dans la science des matériaux

Chapitre 2 Propriétés matérielles de la tôle de cuivre et de molybdène

- 2.1 Propriétés fondamentales du molybdène et du cuivre
- 2.2 Densité de la feuille de cuivre et de molybdène
- 2.3 Propriétés mécaniques de la tôle de cuivre et de molybdène
 - 2.3.1 Dureté de la tôle de cuivre et de molybdène
 - 2.3.2 Ténacité de la tôle de cuivre et de molybdène
 - 2.3.3 Ductilité de la feuille Mo-Cu
 - 2.3.4 Résistance mécanique de la tôle de cuivre-molybdène
 - 2.3.5 Résistance à la fatigue des tôles de cuivre et de molybdène
- 2.4 Propriétés chimiques des feuilles de cuivre et de molybdène
 - 2.4.1 Résistance à la corrosion des tôles de cuivre et de molybdène
 - 2.4.2 Propriétés antioxydantes des feuilles de cuivre et de molybdène
 - 2.4.3 Résistance aux acides et aux alcalis de la tôle de cuivre et de molybdène
- 2.5 Propriétés thermiques de la tôle de cuivre et de molybdène
 - 2.5.1 Conductivité thermique et diffusivité thermique
 - 2.5.2 Comportement et stabilité de la dilatation thermique
 - 2.5.3 Résistance aux hautes températures
- 2.6 Propriétés électriques des feuilles de cuivre-molybdène
 - 2.6.1 Caractéristiques de conductivité et de résistance
 - 2.6.2 Performances des contacts électriques
 - 2.6.3 Stabilité électrochimique
- 2.7 Comparaison entre la feuille de cuivre et de molybdène et d'autres matériaux
- 2.8 Fiche de données de sécurité (FDS) de la feuille de cuivre et de molybdène CTIA GROUP LTD

Chapitre 3 Classification des feuilles de cuivre et de molybdène

- 3.1 Classification par marque (typique) Tôle de cuivre et de molybdène
 - 3.1.1 Mo85Cu15
 - 3.1.2 Mo80Cu20
 - 3.1.3 Mo70Cu30
 - 3.1.4 Mo60Cu40
 - 3.1.5 Mo50Cu50
- 3.2 Classification des tôles de cuivre et de molybdène par procédé de fabrication
 - 3.2.1 Tôle de cuivre et de molybdène fabriquée par métallurgie des poudres
 - 3.2.2 Tôle de molybdène-cuivre fabriquée par infiltration en fusion
- 3.3 Classification des feuilles de cuivre et de molybdène par application
 - 3.3.1 Feuille de cuivre-molybdène générale

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

- 3.3.2 Feuille de cuivre-molybdène haute fréquence
- 3.3.3 Feuille de cuivre et de molybdène pour l'aérospatiale
- 3.3.4 Dispositif photoélectrique de type feuille de cuivre et de molybdène

Chapitre 4 Technologie de préparation des feuilles de cuivre et de molybdène

- 4.1 Préparation de tôles de cuivre et de molybdène par la technologie de la métallurgie des poudres
 - 4.1.1 Flux de processus de la technologie de la métallurgie des poudres
 - 4.1.2 Avantages et limites de la technologie de la métallurgie des poudres
- 4.2 Préparation de feuilles de molybdène-cuivre par méthode d'infiltration
 - 4.2.1 Déroulement du processus d'infiltration de matière fondue
 - 4.2.2 Avantages et limites de la méthode d'infiltration
- 4.3 Application de la technologie d'impression 3D à la préparation de feuilles de cuivre et de molybdène

Chapitre 5 Principaux équipements de production de tôles de cuivre et de molybdène

- 5.1 Équipement de production de technologie de métallurgie des poudres de feuilles de cuivre et de molybdène
 - 5.1.1 Équipement de préparation de poudre
 - 5.1.1.1 Broyeur à boulets
 - 5.1.1.2 Équipement d'atomisation
 - 5.1.2 Équipement de moulage de poudre
 - 5.1.2.1 Presse hydraulique (pour le formage à froid de billettes de molybdène-cuivre)
 - 5.1.2.2 Presse isostatique
 - 5.1.3 Équipement de frittage
 - 5.1.3.1 Four de frittage sous vide
 - 5.1.3.2 Four de frittage à chaud
 - 5.1.4 Équipement de post-traitement
 - 5.1.4.1 Four de traitement thermique
 - 5.1.4.2 Rectifieuse de précision
- 5.2 Équipement de production par infiltration de feuilles de molybdène-cuivre
 - 5.2.1 Presse hydraulique (pour presser la poudre de molybdène en forme)
 - 5.2.2 Four de frittage sous vide (pour le frittage du squelette de molybdène et l'infiltration de cuivre)

Chapitre 6 Méthodes et équipement d'essai des performances des feuilles de cuivre et de molybdène

- 6.1 Essai de densité de la feuille de cuivre et de molybdène
 - 6.1.1 Principe et fonctionnement de la méthode de drainage d'Archimède
- 6.2 Test de porosité d'une feuille de cuivre et de molybdène
 - 6.2.1 Observation et calcul au microscope métallographique
- 6.3 Essai de traction d'une feuille de cuivre et de molybdène
 - 6.3.1 Utilisation d'une machine d'essai de matériaux universelle
- 6.4 Essai de pliage d'une feuille de cuivre et de molybdène
 - 6.4.1 Méthode de flexion en trois points
 - 6.4.2 Méthode de flexion en quatre points
- 6.5 Essai de ténacité aux chocs d'une tôle de cuivre et de molybdène

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

- 6.5.1 Points clés pour le fonctionnement de l'essai d'impact du pendule
- 6.6 Essai de conductivité thermique d'une feuille de cuivre et de molybdène
 - 6.6.1 Principe et application de la méthode du flash laser
- 6.7 Test du coefficient de dilatation thermique d'une feuille de cuivre et de molybdène
 - 6.7.1 Utilisation de l'analyseur thermomécanique (TMA)
- 6.8 Essai de résistivité d'une feuille de cuivre et de molybdène
 - 6.8.1 Processus de mesure à quatre sondes
- 6.9 Essai de résistance de contact d'une feuille de cuivre-molybdène
 - 6.9.1 Spécifications de fonctionnement de la méthode de chute de tension continue

Chapitre 7 Domaines d'application des feuilles de cuivre et de molybdène

- 7.1 Application de la tôle de cuivre et de molybdène dans l'industrie électronique
 - 7.1.1 Matériaux d'emballage
 - 7.1.2 Substrats de circuits intégrés
 - 7.1.3 Composants de dissipation thermique dans les dispositifs à micro-ondes
 - 7.1.4 Composants de support structurel dans les dispositifs à micro-ondes
 - 7.1.5 Matériaux du dissipateur thermique
 - 7.1.6 Module RF
 - 7.1.7 Substrat de dissipation thermique des LED
- 7.2 Application de la tôle de cuivre et de molybdène dans le domaine aérospatial
 - 7.2.1 Composants métalliques d'avions
 - 7.2.2 Matériaux de protection thermique pour engins spatiaux
 - 7.2.3 Composants de missiles et d'engins spatiaux
 - 7.2.4 Radiateur du système radar
 - 7.2.5 Emballage électronique militaire
- 7.3 Application des feuilles de cuivre et de molybdène dans la gestion de l'énergie et de la chaleur
 - 7.3.1 Dispositifs électroniques de puissance
 - 7.3.2 Équipements nucléaires
 - 7.3.3 Systèmes d'énergie renouvelable
 - 7.3.4 Gestion thermique des batteries de véhicules électriques
- 7.4 Feuille de cuivre et de molybdène dans d'autres domaines d'application émergents
 - 7.4.1 Équipement médical
 - 7.4.2 Station de base de communication 7G
 - 7.4.3 Laser et système optique
 - 7.4.4 Fabrication additive et composants personnalisés

Chapitre 8 Statut du marché et de l'industrie des tôles de cuivre et de molybdène

- 8.1 Aperçu du marché mondial des tôles de cuivre et de molybdène
- 8.2 Principaux fabricants de tôles de cuivre et de molybdène - CTIA GROUP LTD
- 8.3 Demande du marché et tendance de développement des tôles de cuivre et de molybdène
- 8.4 Défis et opportunités du marché des feuilles de cuivre et de molybdène

Chapitre 9 Développement futur des tôles de cuivre et de molybdène

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

- 9.1 Potentiel d'une nouvelle technologie de préparation des tôles de cuivre et de molybdène
- 9.2 Orientations de recherche pour optimiser les performances des tôles en cuivre-molybdène
- 9.3 Expansion des applications intersectorielles des tôles de cuivre et de molybdène

Chapitre 10 Normes nationales et internationales pour les tôles de cuivre et de molybdène

- 10.1 Norme nationale chinoise pour les tôles en cuivre et molybdène
- 10.2 Normes internationales pour les tôles de cuivre et de molybdène

Normes relatives aux tôles de cuivre et de molybdène en Europe, en Amérique, au Japon, en Corée du Sud et dans d'autres pays du monde

appendice:

Glossaire des feuilles de cuivre et de molybdène

Références



Image de la feuille de cuivre et de molybdène CTIA GROUP LTD

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 Introduction

1.1 Présentation de la tôle de cuivre et de molybdène

La feuille de cuivre et de molybdène est un matériau composite composé de molybdène et de cuivre, généralement utilisé sous forme de feuilles ou de plaques minces dans les secteurs de l'électronique, de l'aérospatiale, de l'énergie et des industries à haute température. Elle associe le point de fusion élevé, la résistance à la corrosion et l'excellente stabilité thermique du molybdène à la conductivité électrique et thermique élevée du cuivre pour former un matériau avancé aux excellentes propriétés mécaniques et thermoélectriques. La feuille de cuivre et de molybdène est principalement préparée par métallurgie des poudres, en mélangeant de la poudre de molybdène et de la poudre de cuivre dans des proportions spécifiques, en pressant et en frittant, ou en utilisant l'infiltration de cuivre liquide dans la matrice de molybdène pour former une structure composite.

La tôle de cuivre-molybdène présente les caractéristiques remarquables suivantes : sa conductivité thermique élevée en fait un excellent matériau de gestion thermique et convient aux dissipateurs thermiques ; son faible coefficient de dilatation thermique assure sa stabilité dimensionnelle dans les environnements à haute température ; l'ajustement du rapport molybdène-cuivre permet de personnaliser la conductivité thermique, la conductivité électrique et la résistance mécanique pour répondre aux diverses exigences d'application ; son point de fusion élevé (environ 2 623 °C) et sa résistance à la corrosion lui permettent de fonctionner longtemps dans des environnements extrêmes. Ses applications typiques comprennent les substrats de dissipation thermique dans les boîtiers électroniques, les semi-conducteurs de puissance, les dispositifs à micro-ondes et les composants de gestion thermique pour l'aérospatiale. Depuis le milieu et la fin du XXe siècle, avec la croissance de la demande en composants électroniques hautes performances et en applications haute température, la recherche, le développement et la technologie de production des tôles de cuivre-molybdène ont considérablement progressé.

1.2 Composition et structure des matériaux composites molybdène-cuivre

Les matériaux composites molybdène-cuivre sont fabriqués à partir de molybdène et de cuivre par un procédé spécifique, et leurs propriétés dépendent directement du rapport de composition et de la microstructure. La composition du matériau est généralement exprimée en pourcentage massique ou volumique, par exemple pour Mo70Cu30 (70 % de molybdène et 30 % de cuivre) ou Mo85Cu15 et autres nuances courantes. L'augmentation de la teneur en molybdène améliore la résistance mécanique, la résistance aux hautes températures et la faible dilatation thermique du matériau, mais peut légèrement réduire la conductivité thermique et électrique. L'augmentation de la teneur en cuivre, quant à elle, améliore significativement la conductivité thermique et électrique, mais diminue la résistance mécanique et la résistance aux hautes températures. Des additifs traces (tels que le nickel ou l'argent) sont parfois utilisés pour améliorer les performances de frittage ou de liaison des interfaces, mais leur teneur est strictement contrôlée afin d'éviter toute dégradation des performances.

En termes de microstructure, les matériaux composites molybdène-cuivre présentent une structure biphasée : le molybdène forme un squelette continu ou semi-continu, assurant une résistance mécanique

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

et une résistance aux températures élevées. La granulométrie est généralement comprise entre 1 et 10 microns. Le cuivre remplit les pores du squelette de molybdène pour former un réseau conducteur thermique et électrique continu. La liaison interfaciale des deux phases dépend principalement de l'intercalation physique et de la diffusion lors du frittage. Une bonne liaison interfaciale permet de réduire efficacement la résistance thermique et électrique. La microscopie électronique à balayage (MEB) et la diffraction des rayons X (DRX) montrent que les particules de molybdène sont généralement enveloppées uniformément par la matrice de cuivre, et que la continuité de la phase de cuivre augmente avec la teneur en cuivre.

Le procédé de préparation a un impact significatif sur la structure du matériau. La métallurgie des poudres permet de contrôler précisément le rapport de composition par mélange de poudres de molybdène et de cuivre, pressage et frittage, et convient à la production de feuilles de cuivre-molybdène haute densité. La méthode d'infiltration par fusion est adaptée aux matériaux à forte teneur en cuivre par infiltration de cuivre liquide dans un squelette poreux de molybdène, mais les exigences de contrôle du procédé sont élevées. La méthode de pressage et frittage à chaud, qui consiste à former directement sous haute température et haute pression, est adaptée aux exigences de haute performance, mais son coût est élevé. Différents procédés entraînent des différences de granulométrie, de distribution de phase et de résistance de liaison à l'interface, ce qui affecte les propriétés du matériau.

1.3 Importance de la feuille de cuivre et de molybdène dans la science des matériaux

Le molybdène est un matériau précieux pour les applications en science et ingénierie des matériaux. Ses performances en gestion thermique sont particulièrement remarquables. Avec l'évolution des appareils électroniques vers une densité de puissance élevée et la miniaturisation, la gestion thermique est devenue un facteur clé pour limiter les performances et la durée de vie. Grâce à son excellente conductivité thermique et à son coefficient de dilatation thermique similaire à celui des matériaux céramiques (tels que l'alumine et le nitrure de silicium), la feuille de cuivre au molybdène est devenue un matériau idéal pour les boîtiers électroniques, les semi-conducteurs de puissance (tels que les IGBT, les MOSFET), les dispositifs micro-ondes et les dissipateurs thermiques laser. Elle conduit efficacement la chaleur et réduit les fissures d'interface causées par les contraintes thermiques, améliorant ainsi la fiabilité et la durée de vie des appareils.

Dans le domaine des dispositifs électroniques hautes performances, la conductivité électrique et thermique des feuilles de cuivre-molybdène en fait des matériaux de base pour les équipements de communication 5G et les modules de puissance des véhicules à énergie nouvelle. Leurs performances adaptables répondent à différentes exigences de conception et favorisent le développement de dispositifs électroniques plus performants et miniaturisés. De plus, leur point de fusion élevé et leur résistance à la corrosion leur confèrent des avantages significatifs dans les environnements extrêmes, tels que les composants d'échange thermique des réacteurs haute température de l'industrie nucléaire et les composants haute température des réacteurs aérospatiaux, démontrant ainsi leur fiabilité et leur stabilité dans des conditions difficiles.

Le cuivre-molybdène ont également favorisé les progrès de la conception et de la technologie de

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

préparation des matériaux composites. L'exploration de l'optimisation des interfaces, de la régulation de la microstructure et de nouveaux procédés de préparation a non seulement amélioré les performances des feuilles de molybdène-cuivre, mais a également fourni des références théoriques et pratiques pour le développement d'autres matériaux composites à base de métaux (tels que le tungstène-cuivre et l'aluminium-silicium), et a favorisé l'intégration interdisciplinaire de concepts de conception de matériaux multifonctionnels. De plus, le procédé de préparation des feuilles de molybdène-cuivre est mature, les matières premières molybdène et cuivre sont abondantes et recyclables, le coût est relativement faible et le produit présente une rentabilité et une durabilité élevées, ce qui le rend adapté à une production et une application à grande échelle.

En résumé, les feuilles de cuivre-molybdène jouent un rôle essentiel dans la gestion thermique, les dispositifs électroniques hautes performances et les applications en environnements extrêmes grâce à leurs propriétés thermoélectriques, mécaniques et adaptables uniques. Leur recherche et leur application répondent non seulement aux besoins de l'industrie moderne en matériaux hautes performances, mais favorisent également le développement innovant de la science des matériaux. Grâce aux progrès technologiques, l'optimisation des performances et les domaines d'application des feuilles de cuivre-molybdène seront encore élargis, apportant un soutien important au progrès scientifique et industriel.

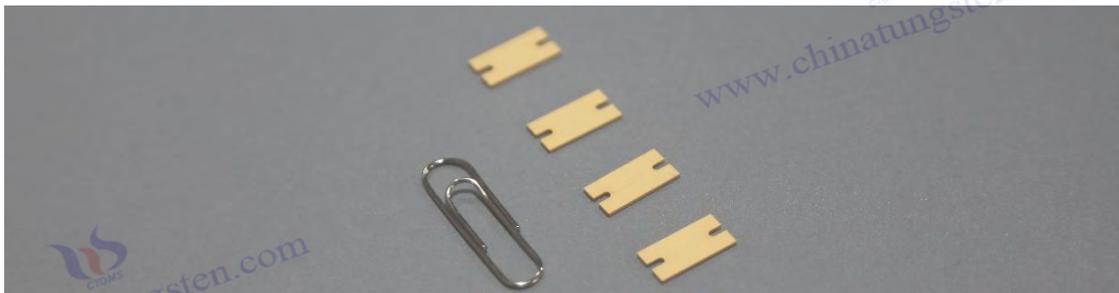


Image de la feuille de cuivre et de molybdène CTIA GROUP LTD

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

Chapitre 2 Propriétés matérielles de la feuille de cuivre et de molybdène

2.1 Propriétés fondamentales du molybdène et du cuivre

Le molybdène et le cuivre sont les principaux composants des composites molybdène-cuivre, et leurs propriétés physiques et chimiques respectives déterminent leurs performances. Le molybdène est un métal de transition à point de fusion élevé, dont le point de fusion est d'environ 2 623 °C. Il présente une excellente résistance aux températures élevées et à la corrosion. Son faible coefficient de dilatation thermique (environ $4,8 \times 10^{-6}$ /K à 25 °C) lui permet de maintenir une stabilité dimensionnelle dans des environnements à haute température. Le molybdène présente une résistance élevée, mais sa conductivité électrique (environ 18 % IACS) et sa conductivité thermique (environ 138 W/ m·K) sont relativement faibles. Le cuivre est connu pour sa conductivité électrique élevée (proche de 100 % IACS) et sa conductivité thermique élevée (environ 401 W/ m·K). Son point de fusion est de 1085°C, ce qui en fait un matériau idéal pour la gestion thermique et la transmission électrique, mais son coefficient de dilatation thermique est élevé (environ $16,5 \times 10^{-6}$ /K à 25°C), et sa résistance diminue à haute température. Le molybdène et le cuivre ne sont pas totalement solubles l'un dans l'autre à l'échelle atomique, formant une structure biphasée : le molybdène forme le squelette, assurant le support structurel et la résistance aux hautes températures ; le cuivre remplit les pores pour former un réseau conducteur thermique et électrique . Cette complémentarité permet aux feuilles de molybdène-cuivre d'atteindre un équilibre entre conductivité thermique, conductivité électrique et propriétés mécaniques, répondant ainsi aux besoins de l'électronique, de l'aérospatiale et d'autres secteurs.

2.2 Densité de la feuille de cuivre et de molybdène

La feuille de cuivre-molybdène est une propriété physique clé qui influence le poids du matériau, la conductivité thermique et l'applicabilité. La densité dépend du rapport molybdène/ cuivre, qui se situe entre la densité du molybdène (10,28 g/cm³) et celle du cuivre (8,96 g/cm³). Les feuilles de cuivre-molybdène à forte teneur en molybdène ont une densité plus élevée et conviennent aux applications exigeant une résistance élevée aux températures élevées, telles que les pièces aéronautiques haute température. Les feuilles de cuivre-molybdène à forte teneur en cuivre ont une densité plus faible, ce qui contribue à réduire le poids de l'appareil et convient à la conception légère des appareils électroniques portables et de l'aérospatiale. Le procédé de préparation a un impact significatif sur la densité : la métallurgie des poudres permet d'obtenir des matériaux proches de la densité théorique grâce au moulage haute pression et au frittage haute température, atteignant généralement plus de 98 % ; la méthode d'infiltration par fusion peut entraîner une densité légèrement inférieure en raison de pores résiduels. La densité affecte également la capacité thermique et la conductivité thermique. Une faible densité s'accompagne généralement d'une conductivité thermique élevée, mais peut compromettre une certaine stabilité à haute température. Par conséquent, la densité est un paramètre important à prendre en compte lors de la conception des tôles de cuivre-molybdène.

2.3 Propriétés mécaniques de la tôle de cuivre et de molybdène

Les tôles de cuivre et de molybdène se caractérisent par leur dureté, leur ténacité et leur résistance

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

mécanique, qui déterminent leurs performances sous contrainte mécanique et déformation. La résistance élevée du molybdène et la ductilité du cuivre déterminent ensemble leurs propriétés mécaniques, dont les propriétés spécifiques varient selon la composition et le procédé de préparation.

2.3.1 Dureté de la tôle de cuivre et de molybdène

La dureté reflète la capacité des feuilles de cuivre-molybdène à résister à la déformation locale et à l'usure. Elle est généralement mesurée par la dureté Vickers (HV). La dureté élevée du molybdène (environ 230-250 HV) confère au matériau composite une excellente résistance à l'usure, tandis que la dureté plus faible du cuivre (environ 50-70 HV) confère à ce matériau à forte teneur en cuivre une plus grande flexibilité.

Les feuilles de cuivre-molybdène à haute teneur en molybdène (comme le Mo85Cu15) présentent une dureté plus élevée, proche de celle du molybdène, et conviennent aux substrats de dissipation thermique des boîtiers électroniques exigeant une résistance à l'usure. Les feuilles de cuivre-molybdène à haute teneur en cuivre présentent une dureté plus faible, mais une meilleure ductilité, et conviennent aux applications exigeant une certaine flexibilité. Le frittage à chaud augmente la densité et la dureté grâce à des températures et des pressions élevées ; un frittage insuffisant par métallurgie des poudres peut entraîner une réduction de la dureté due à la présence de pores. La dureté des feuilles de cuivre-molybdène leur permet de résister aux contraintes d'usure et d'assemblage et de préserver l'intégrité de leur surface à haute température.

2.3.2 Ténacité de la tôle de cuivre et de molybdène

La ténacité désigne la capacité des tôles de cuivre-molybdène à absorber l'énergie et à résister à la rupture. Elle constitue un facteur clé de performance sous charges dynamiques ou environnements d'impact. Le molybdène pur présente une faible ténacité et est cassant, tandis que le cuivre offre une excellente ductilité et une excellente ténacité. Les composites molybdène-cuivre améliorent la ténacité globale et évitent la rupture fragile grâce à l'ajout de cuivre. Les tôles de cuivre-molybdène à forte teneur en cuivre (comme le Mo60Cu40) présentent une bonne ténacité et conviennent aux applications de gestion thermique exigeant une résistance aux chocs. Les matériaux à forte teneur en molybdène (comme le Mo85Cu15) présentent une ténacité plus faible mais une résistance mécanique plus élevée et conviennent aux exigences de résistance élevée. Les tôles de cuivre et de molybdène préparées par infiltration en fusion présentent généralement une meilleure ténacité que les tôles issues de la métallurgie des poudres, grâce à la répartition uniforme de la phase cuivre. La qualité de l'interface est essentielle à la ténacité. Une bonne interface cuivre et molybdène permet un transfert efficace des contraintes et réduit la propagation des fissures. La ténacité des tôles de cuivre et de molybdène leur permet de résister aux chocs et aux charges cycliques dans les environnements aérospatiaux ou à fortes vibrations, prolongeant ainsi leur durée de vie.

2.3.3 Ductilité de la feuille Mo-Cu

La ductilité reflète la capacité des feuilles de cuivre-molybdène à subir une déformation plastique sans

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

rupture sous contrainte. C'est une caractéristique importante pour s'adapter à des formes complexes ou à des exigences de déformation lors de la transformation et des applications. Le molybdène présente une faible ductilité et est plus cassant, tandis que le cuivre présente une excellente ductilité (allongement pouvant atteindre 40 à 50 %) et peut absorber une grande quantité d'énergie de déformation lors de l'étirement ou de la flexion.

Molybdène -cuivre sont principalement affectés par leur teneur en cuivre. Les feuilles de molybdène-cuivre à forte teneur en cuivre (comme le Mo60Cu40) présentent une bonne ductilité et peuvent supporter d'importantes déformations plastiques. Elles conviennent aux encapsulations électroniques ou aux composants de gestion thermique nécessitant un moulage. Les feuilles de molybdène-cuivre à forte teneur en molybdène (comme le Mo85Cu15) présentent une ductilité plus faible et tendent à présenter des structures plus rigides, adaptées aux scénarios exigeant une résistance élevée. Le procédé de préparation affecte également la ductilité. La méthode d'infiltration par fusion peut améliorer la ductilité grâce à une phase de cuivre uniformément répartie, tandis que la méthode de métallurgie des poudres peut la réduire en cas de pores ou de mauvaise liaison à l'interface. La ductilité des feuilles de molybdène-cuivre leur confère un avantage de mise en œuvre lors de la fabrication de substrats de dissipation thermique de formes complexes ou de composants aérospatiaux, tout en réduisant le risque de rupture fragile sous charges cycliques.

2.3.4 Résistance mécanique de la tôle de cuivre-molybdène

La résistance mécanique désigne la capacité des feuilles de cuivre-molybdène à résister aux dommages externes, généralement caractérisée par la résistance à la traction ou la limite d'élasticité, et constitue une performance clé dans les applications structurelles. Le molybdène présente une résistance à la traction élevée (environ 600 à 800 MPa, selon l'état de traitement), ce qui assure un support mécanique solide aux matériaux composites. Le cuivre, quant à lui, présente une résistance à la traction plus faible (environ 200 à 250 MPa), mais contribue à améliorer la ductilité du matériau. Les feuilles de cuivre-molybdène à forte teneur en molybdène (comme le Mo85Cu15) présentent une résistance mécanique élevée, proche de celle du molybdène, et conviennent aux composants aérospatiaux à haute température et à fortes contraintes ou aux substrats de dispositifs électroniques. Les feuilles de cuivre-molybdène à forte teneur en cuivre (comme le Mo60Cu40) présentent une résistance plus faible, mais sont plus flexibles et adaptées aux applications nécessitant une certaine déformation. Le frittage par pressage à chaud peut améliorer considérablement la résistance mécanique en augmentant la densité du matériau, tandis que la métallurgie des poudres peut entraîner une diminution de la résistance due à la porosité si le frittage est insuffisant. La résistance mécanique des feuilles de cuivre-molybdène leur permet de supporter les contraintes d'assemblage dans les boîtiers électroniques, de maintenir la stabilité structurelle dans les environnements à haute température et de répondre à des exigences de fiabilité élevées.

2.3.5 Résistance à la fatigue des tôles de cuivre et de molybdène

La résistance à la fatigue reflète la capacité des tôles de cuivre-molybdène à résister à l'amorçage et à l'expansion de fissures sous des charges cycliques. Il s'agit d'une caractéristique importante dans les environnements dynamiques ou vibratoires. Le molybdène pur présente une faible résistance à la fatigue

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

et est sujet aux microfissures sous contrainte cyclique, tandis que l'excellente ductilité et la ténacité du cuivre contribuent à absorber les contraintes cycliques et à améliorer la durée de vie en fatigue. La résistance à la fatigue des composites molybdène-cuivre s'améliore avec l'augmentation de la teneur en cuivre. Les tôles de cuivre-molybdène à forte teneur en cuivre (comme le Mo60Cu40) présentent une durée de vie en fatigue plus longue sous des charges cycliques et sont adaptées aux environnements à fortes vibrations, comme les composants de gestion thermique des dispositifs aérospatiaux ; les tôles de cuivre-molybdène à forte teneur en molybdène (comme le Mo85Cu15) ont une résistance à la fatigue légèrement inférieure, mais peuvent supporter des amplitudes de contrainte plus élevées grâce à leur résistance mécanique élevée. Le procédé de préparation a un impact significatif sur la résistance à la fatigue. Les tôles de cuivre-molybdène préparées par infiltration en fusion peuvent efficacement inhiber la propagation des fissures grâce à une répartition uniforme de la phase de cuivre et à une bonne liaison à l'interface. Les méthodes de métallurgie des poudres peuvent accélérer la rupture par fatigue en présence de micropores ou de défauts d'interface. La résistance à la fatigue des tôles de cuivre-molybdène leur permet de supporter des charges cycliques à long terme dans les dispositifs semi-conducteurs de puissance ou les composants aérospatiaux haute température, garantissant ainsi une fiabilité à long terme.

2.4 Propriétés chimiques des feuilles de cuivre et de molybdène

Molybdène, notamment leur résistance à la corrosion, à l'oxydation et aux acides et aux alcalis, déterminent leur stabilité et leur durée de vie dans des environnements chimiques agressifs. Les propriétés chimiques du molybdène et du cuivre sont très différentes. Le molybdène présente une excellente résistance à la corrosion et à l'oxydation, tandis que le cuivre est sensible à l'oxydation ou à la corrosion dans des environnements spécifiques. Les propriétés chimiques des composites molybdène-cuivre sont optimisées grâce à l'effet synergique de la structure biphasée, et leurs performances spécifiques dépendent du rapport de composition, de la microstructure et du procédé de préparation.

2.4.1 Résistance à la corrosion des tôles de cuivre et de molybdène

La résistance à la corrosion reflète la capacité des feuilles de cuivre-molybdène à résister à l'érosion de surface et à la dégradation des performances au contact de milieux corrosifs (tels que l'humidité, le brouillard salin ou les gaz chimiques). Le molybdène présente une excellente résistance à la corrosion et peut rester stable dans divers environnements chimiques, notamment dans les acides non oxydants et les solutions salines ; le cuivre présente une faible résistance à la corrosion, notamment dans les environnements humides ou chlorés, et est sujet à la corrosion électrochimique. La résistance à la corrosion des matériaux composites molybdène-cuivre est principalement dominée par la phase molybdène. Les feuilles de cuivre-molybdène à forte teneur en molybdène (comme Mo85Cu15) présentent une bonne stabilité en environnement corrosif et conviennent aux composants de gestion thermique des dispositifs aérospatiaux ou des environnements marins ; les feuilles de cuivre-molybdène à forte teneur en cuivre (comme Mo60Cu40) présentent une résistance à la corrosion légèrement faible et peuvent subir une corrosion en phase cuivre dans des environnements à forte humidité ou au brouillard salin. Le procédé de préparation a une certaine influence sur la résistance à la corrosion. Le frittage par pressage à chaud peut réduire la pénétration des milieux corrosifs en augmentant la densité et en réduisant les pores ; la métallurgie des poudres peut accélérer la corrosion locale en présence de micropores. La

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

résistance à la corrosion des feuilles de cuivre-molybdène leur permet de conserver leurs performances longtemps dans les boîtiers électroniques et les environnements à haute température, prolongeant ainsi la durée de vie des appareils.

2.4.2 Propriétés antioxydantes des feuilles de cuivre et de molybdène

La performance antioxydante désigne la capacité des feuilles de cuivre-molybdène à résister aux réactions d'oxydation et à l'oxydation superficielle à haute température ou dans des environnements contenant de l'oxygène. Le molybdène réagit facilement avec l'oxygène pour former des oxydes volatils (tels que MoO₃) à haute température (supérieure à environ 600 °C), mais sa vitesse d'oxydation est lente, et la distribution de la phase de cuivre dans les composites de cuivre et de molybdène peut atténuer partiellement la tendance à l'oxydation du molybdène. Le cuivre forme une couche protectrice dense d'oxyde de cuivre (Cu₂O) à température ambiante, qui présente une certaine résistance à l'oxydation, mais il est facile de s'oxyder davantage pour former des oxydes libres (CuO) à haute température (supérieure à environ 300 °C), ce qui réduit les performances. Les feuilles de cuivre et de molybdène à haute teneur en molybdène (comme Mo85Cu15) ont une bonne résistance à l'oxydation à haute température et conviennent aux composants aérospatiaux à haute température ou aux substrats de dissipation thermique des semi-conducteurs de puissance ; les feuilles de cuivre et de molybdène à haute teneur en cuivre (comme Mo60Cu40) ont des performances légèrement inférieures dans les environnements oxydants à haute température et doivent éviter une exposition à long terme à des environnements contenant de l'oxygène à haute température.

Le traitement de surface (tel que le nickelage ou le placage à l'or) ou l'optimisation du procédé de préparation (comme le frittage par pressage à chaud pour augmenter la densité) peuvent améliorer considérablement la résistance à l'oxydation et réduire la production d'oxyde. La résistance à l'oxydation de la feuille de cuivre-molybdène lui permet de maintenir sa stabilité structurelle et fonctionnelle dans les appareils électroniques haute température ou les environnements industriels.

2.4.3 Résistance aux acides et aux alcalis de la tôle de cuivre et de molybdène

La résistance aux acides et aux alcalis reflète la stabilité chimique des feuilles de cuivre-molybdène en milieu acide ou alcalin, et constitue une caractéristique importante dans les procédés chimiques ou les environnements industriels spécifiques. Le molybdène présente une excellente résistance à la corrosion par les acides non oxydants (tels que l'acide chlorhydrique et l'acide sulfurique), mais se corrode facilement dans les acides fortement oxydants (tels que l'acide nitrique). Le cuivre est sensible à la plupart des milieux acides, particulièrement soluble dans les acides oxydants, mais relativement stable dans les milieux faiblement alcalins.

La résistance aux acides et aux alcalis des matériaux composites molybdène-cuivre est améliorée grâce à leur forte teneur en molybdène. Les feuilles de cuivre-molybdène à forte teneur en molybdène (comme Mo85Cu15) présentent une bonne stabilité en milieu acide non oxydant et faiblement alcalin, et conviennent aux composants de gestion thermique dans l'industrie chimique. Les feuilles de cuivre-molybdène à forte teneur en cuivre (comme Mo60Cu40) présentent une faible résistance à la corrosion

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

en milieu acide et doivent éviter tout contact avec des acides forts.

Le procédé de préparation a un impact sur la résistance aux acides et aux bases. La méthode d'infiltration par fusion peut réduire le risque de corrosion locale grâce à une distribution uniforme de la phase cuivre. La présence de pores dans la méthode de métallurgie des poudres peut entraîner une pénétration des milieux acides et alcalins et accélérer la corrosion. La résistance aux acides et aux bases de la tôle de cuivre-molybdène lui permet de maintenir ses performances dans la fabrication de dispositifs électroniques ou en milieu chimique, afin de répondre aux exigences spécifiques de ses applications.

2.5 Propriétés thermiques de la tôle de cuivre et de molybdène

molybdène, notamment leur conductivité et diffusivité thermiques, leur comportement et leur stabilité à la dilatation thermique, ainsi que leur résistance aux hautes températures, constituent leurs principaux atouts pour la gestion thermique, les applications haute température et les dispositifs électroniques. Les propriétés thermiques du molybdène et du cuivre se complètent : le cuivre assure une conductivité thermique élevée, tandis que le molybdène contribue à une faible dilatation thermique et à une stabilité à haute température. Ces feuilles constituent ainsi un matériau de gestion thermique idéal pour les applications de conditionnement électronique, d'aérospatiale et d'énergie. Le rapport molybdène/cuivre, la microstructure et le procédé de préparation influent fortement sur les propriétés thermiques.

2.5.1 Conductivité thermique et diffusivité thermique

La conductivité thermique et la diffusivité thermique sont des paramètres clés pour mesurer la capacité des feuilles de cuivre-molybdène à conduire la chaleur, ce qui affecte directement leurs performances en matière de dissipation et de gestion thermique. Le cuivre présente une conductivité thermique extrêmement élevée (environ $401 \text{ W/m}\cdot\text{K}$) et est un excellent conducteur thermique, tandis que le molybdène présente une conductivité thermique plus faible.

La conductivité thermique des matériaux composites molybdène-cuivre augmente avec la teneur en cuivre. Les feuilles de molybdène-cuivre à forte teneur en cuivre (comme le Mo60Cu40) présentent une conductivité thermique élevée, proche de $200\text{-}250 \text{ W/m}\cdot\text{K}$, ce qui convient aux substrats de dissipation thermique des semi-conducteurs de puissance et des dispositifs micro-ondes. Les feuilles de molybdène-cuivre à forte teneur en molybdène présentent une faible conductivité thermique, d'environ $150\text{-}180 \text{ W/m}\cdot\text{K}$, mais restent supérieures à de nombreux matériaux traditionnels et conviennent aux scénarios exigeant à la fois résistance et conductivité thermique. La diffusivité thermique reflète la capacité d'un matériau à conduire rapidement la chaleur, ce qui est lié à la conductivité thermique et à la densité. Les feuilles de molybdène-cuivre à forte teneur en cuivre présentent une diffusivité thermique élevée, ce qui contribue à une dissipation rapide de la chaleur. Le procédé de préparation a un impact significatif sur la conductivité thermique. La méthode de frittage par pressage à chaud améliore l'efficacité de la conduction thermique en augmentant la densité. La métallurgie des poudres peut réduire la conductivité thermique en présence de pores. L'excellente conductivité thermique et la diffusivité thermique des feuilles de molybdène-cuivre leur permettent de gérer efficacement la chaleur dans les appareils électroniques de forte puissance et d'améliorer leurs performances et leur durée de vie.

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

2.5.2 Comportement et stabilité de la dilatation thermique

Le comportement et la stabilité de la dilatation thermique reflètent le degré de variation dimensionnelle des feuilles de cuivre-molybdène lorsque la température varie, ainsi que leur stabilité structurelle, caractéristiques essentielles à leur application dans des environnements soumis à des cycles thermiques. Le molybdène présente un faible coefficient de dilatation thermique (environ $4,8 \times 10^{-6}$ /K à 25 °C), ce qui lui permet de résister efficacement aux déformations dues à la température ; le cuivre présente un coefficient de dilatation thermique plus élevé (environ $16,5 \times 10^{-6}$ /K à 25 °C), ce qui favorise les contraintes thermiques. Le coefficient de dilatation thermique des matériaux composites molybdène-cuivre se situe entre les deux et diminue avec l'augmentation de la teneur en molybdène. Les tôles de cuivre-molybdène à haute teneur en molybdène (comme le Mo85Cu15) présentent un coefficient de dilatation thermique proche de $5-7 \times 10^{-6}$ /K, comparable à celui des matériaux céramiques (comme l'alumine et le nitrure de silicium) et adaptées à la réduction des fissures d'interface causées par les contraintes thermiques dans les boîtiers électroniques. Les tôles de cuivre-molybdène à haute teneur en cuivre (comme le Mo60Cu40) présentent un coefficient de dilatation thermique plus élevé, d'environ $8-10 \times 10^{-6}$ /K, adapté aux applications de dissipation thermique avec des exigences moins strictes en matière de dilatation thermique. La stabilité de la dilatation thermique est également affectée par la microstructure. Une interface molybdène-cuivre uniforme et une structure dense peuvent réduire la concentration des contraintes thermiques. Le frittage par pressage à chaud améliore la stabilité de la dilatation thermique en optimisant la liaison des interfaces, tandis que la métallurgie des poudres peut entraîner une concentration locale des contraintes en cas de défauts. La faible dilatation thermique et la grande stabilité de la feuille de molybdène-cuivre lui permettent de maintenir l'intégrité structurelle dans un environnement de cycle à haute température et de prolonger la durée de vie de l'appareil.

2.5.3 Résistance aux hautes températures

La résistance aux hautes températures reflète la capacité des feuilles de cuivre-molybdène à maintenir une stabilité physique et chimique dans des environnements à haute température, une caractéristique importante dans l'aérospatiale, l'industrie nucléaire et les appareils électroniques haute température. Le point de fusion élevé du molybdène (environ 2 623 °C) confère aux matériaux composites une excellente résistance aux hautes températures, tandis que le point de fusion bas du cuivre (1 085 °C) limite l'utilisation de matériaux à forte teneur en cuivre à des températures extrêmement élevées. Les feuilles de cuivre-molybdène à forte teneur en molybdène (comme Mo85Cu15) peuvent maintenir une structure et des performances stables à des températures élevées de 600 à 800 °C, ce qui les rend adaptées aux composants de moteurs à réaction aéronautiques ou aux composants d'échange thermique de réacteurs nucléaires. Les feuilles de cuivre-molybdène à forte teneur en cuivre (comme Mo60Cu40) présentent une résistance aux hautes températures légèrement inférieure, et la température de fonctionnement recommandée est inférieure à 400 °C pour éviter le ramollissement ou l'oxydation de la phase cuivre. Le procédé de préparation a une influence importante sur la résistance aux hautes températures. La méthode de frittage par pressage à chaud améliore la stabilité à haute température en augmentant la densité et la résistance de l'interface. Une répartition inégale de la phase de cuivre lors de l'infiltration en fusion peut entraîner une dégradation des performances à haute température. Un traitement de surface (tel que le nickelage) peut améliorer encore la résistance à haute température et réduire l'oxydation. La résistance à

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

haute température des tôles de cuivre-molybdène leur permet de fonctionner longtemps dans des environnements thermiques difficiles et de répondre à des exigences de fiabilité élevées.

2.6 Propriétés électriques des feuilles de cuivre-molybdène

Molybdène, notamment leurs caractéristiques de conductivité et de résistance, leurs performances de contact électrique et leur stabilité électrochimique, sont essentielles à leur application dans les dispositifs électroniques, les modules de puissance et les composants conducteurs. La conductivité élevée du cuivre, combinée à la stabilité structurelle du molybdène, confère aux feuilles de cuivre-molybdène des avantages uniques en termes de propriétés électriques, répondant aux exigences des dispositifs électroniques hautes performances en matière de conductivité et de fiabilité. Les propriétés électriques sont influencées par le rapport molybdène-cuivre, la microstructure et le procédé de préparation.

2.6.1 Caractéristiques de conductivité et de résistance

Les propriétés de conductivité et de résistance reflètent la capacité des feuilles de cuivre-molybdène à conduire le courant et constituent leur principale performance dans les applications conductrices. Le cuivre présente une conductivité extrêmement élevée (proche de 100 % IACS, norme internationale pour le cuivre recuit) et constitue un excellent matériau conducteur, tandis que le molybdène présente une conductivité plus faible (environ 18 % IACS). La conductivité des matériaux composites molybdène-cuivre augmente avec la teneur en cuivre. Les feuilles de cuivre-molybdène à forte teneur en cuivre (comme Mo60Cu40) présentent une conductivité élevée, proche de 30 à 40 % IACS, ce qui convient aux substrats conducteurs des semi-conducteurs de puissance et des dispositifs micro-ondes ; les feuilles de cuivre-molybdène à forte teneur en molybdène (comme Mo85Cu15) présentent une faible conductivité, d'environ 20 à 25 % IACS, mais restent suffisantes pour répondre aux besoins de nombreuses applications électroniques.

La résistance est directement liée à la conductivité. Les feuilles de cuivre-molybdène à forte teneur en cuivre présentent une faible résistance, ce qui contribue à réduire les pertes de puissance et la production de chaleur. Le procédé de préparation a un impact significatif sur la conductivité. Le frittage par pressage à chaud permet d'améliorer la conductivité en augmentant la densité et en optimisant l'interface cuivre-molybdène ; la métallurgie des poudres peut augmenter la résistance en cas de pores ou de défauts d'interface. L'excellente conductivité et la faible résistance des feuilles de cuivre-molybdène leur permettent de conduire efficacement le courant dans les dispositifs électroniques de forte puissance, de réduire les pertes d'énergie et d'améliorer les performances des dispositifs.

2.6.2 Performances des contacts électriques

La performance des contacts électriques désigne la capacité des feuilles de cuivre-molybdène à maintenir une faible résistance de contact et une connexion électrique stable aux interfaces de contact (connecteurs ou électrodes, par exemple). La faible résistance de contact et la conductivité élevée du cuivre en font un matériau de contact idéal, tandis que la dureté et la résistance à l'usure élevées du molybdène contribuent à maintenir la stabilité mécanique de l'interface de contact.

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

Les performances des matériaux composites molybdène-cuivre s'améliorent avec l'augmentation de la teneur en cuivre. Les feuilles de molybdène-cuivre à forte teneur en cuivre (comme le Mo60Cu40) présentent une faible résistance de contact et conviennent aux composants de connexion électrique des dispositifs électroniques à courant élevé, tels que les substrats conducteurs des modules de puissance. Les feuilles de molybdène-cuivre à forte teneur en molybdène (comme le Mo85Cu15) présentent une résistance de contact légèrement supérieure, mais grâce à leur dureté élevée, elles résistent à l'usure et conviennent aux applications nécessitant un contact stable à long terme. Un traitement de surface (comme l'argenture ou l'orfèvrerie) peut réduire davantage la résistance de contact et améliorer la résistance à l'usure. Le processus de préparation a une influence importante sur les performances des contacts électriques. La méthode d'infiltration par fusion permet d'optimiser l'interface de contact grâce à une distribution uniforme de la phase de cuivre ; la métallurgie des poudres peut entraîner une résistance de contact accrue en présence de micropores. Les performances de contact électrique des feuilles de molybdène-cuivre leur permettent de maintenir des connexions électriques fiables dans les boîtiers électroniques et les dispositifs de puissance, réduisant ainsi le risque de défaillance des contacts.

2.6.3 Stabilité électrochimique

La stabilité électrochimique reflète la capacité des feuilles de cuivre-molybdène à résister à la corrosion électrochimique dans des environnements électrochimiques (tels que les solutions électrolytiques ou les environnements salins humides). Le molybdène présente une excellente résistance à la corrosion et se comporte bien dans les électrolytes non oxydants, mais peut être corrodé dans les environnements fortement oxydants ; le cuivre présente une faible stabilité électrochimique et est sujet à la corrosion électrochimique dans les environnements humides ou chlorés. La stabilité électrochimique des composites molybdène-cuivre est principalement dominée par la phase molybdène. Les feuilles de cuivre-molybdène à forte teneur en molybdène (comme Mo85Cu15) présentent une bonne stabilité dans les environnements électrochimiques et conviennent aux composants conducteurs en milieu marin ou dans l'industrie chimique ; les feuilles de cuivre-molybdène à forte teneur en cuivre (comme Mo60Cu40) ont une faible stabilité électrochimique et peuvent souffrir de corrosion de la phase cuivre dans des environnements à forte humidité ou au brouillard salin. Le procédé de préparation a un impact sur la stabilité électrochimique. Le frittage par pressage à chaud peut réduire la pénétration de l'électrolyte et les risques de corrosion en augmentant la densité et en réduisant les pores ; la métallurgie des poudres peut accélérer la corrosion électrochimique locale en présence de micropores. Les couches protectrices de surface (comme le nickelage) peuvent améliorer considérablement la stabilité électrochimique. La stabilité électrochimique des feuilles de cuivre-molybdène leur permet de maintenir leurs performances pendant longtemps dans les applications de contact électrique et de conduction, prolongeant ainsi la durée de vie des appareils.

2.7 Comparaison entre la feuille de cuivre et de molybdène et d'autres matériaux

Au molybdène présente des avantages uniques dans la gestion thermique, l'électronique et les applications à haute température. Comparée à d'autres matériaux couramment utilisés (tels que le cuivre pur, le cuivre tungstène, l'aluminium-silicium et les matériaux céramiques), ses performances sont équilibrées en termes de conductivité thermique, de dilatation thermique, de propriétés mécaniques et de

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

coût. Le cuivre pur présente une conductivité thermique extrêmement élevée (environ 401 W/ m·K) et une conductivité électrique (100 % IACS), mais son coefficient de dilatation thermique est élevé (environ $16,5 \times 10^{-6}$ /K à 25 °C) et sa résistance à haute température est faible (environ 200-250 MPa), ce qui ne convient pas aux environnements à haute température ou à cycle thermique ; Les feuilles de cuivre-molybdène (comme le Mo60Cu40) présentent une conductivité thermique légèrement inférieure (environ 200-250 W/ m·K), mais un coefficient de dilatation thermique plus faible (environ $8-10 \times 10^{-6}$ /K), une meilleure stabilité à haute température et conviennent au conditionnement électronique. La conductivité thermique des composites tungstène-cuivre est comparable à celle du cuivre-molybdène (environ 180-220 W/ m·K), mais leur densité est plus élevée (environ 15-17 g/cm³ contre 9-10 g/cm³ pour le cuivre-molybdène), leur coût est plus élevé et leur mise en œuvre est complexe. Les feuilles de cuivre-molybdène présentent une densité plus faible, des avantages économiques et conviennent aux applications légères. Français Les composites aluminium-silicium (tels que AlSiC) ont une conductivité thermique légèrement inférieure (environ 150-200 W/ m·K), mais leur coefficient de dilatation thermique est proche de celui du cuivre-molybdène et leur poids est plus léger, ce qui les rend adaptés à l'aérospatiale. Cependant, leur résistance mécanique et leur résistance aux températures élevées ne sont pas aussi bonnes que celles des feuilles de cuivre-molybdène. Les matériaux céramiques (tels que l'oxyde d'aluminium et le nitrure de silicium) ont un faible coefficient de dilatation thermique (environ $4-7 \times 10^{-6}$ /K), mais une faible conductivité thermique et électrique (l'oxyde d'aluminium est d'environ 20-30 W/ m·K), ce qui les rend inadaptés aux applications conductrices, tandis que les feuilles de cuivre-molybdène présentent à la fois des capacités de conductivité et de gestion thermique. Le processus de fabrication des feuilles de molybdène-cuivre (comme la métallurgie des poudres ou l'infiltration en fusion) est relativement mature, les matières premières molybdène et cuivre ont des réserves abondantes, une forte recyclabilité et un coût inférieur à celui du tungstène-cuivre et de certains matériaux céramiques, ce qui le rend largement compétitif dans les domaines de l'électronique, de l'aérospatiale et de l'énergie.

2.8 Fiche de données de sécurité (FDS) de la feuille de cuivre et de molybdène CTIA GROUP LTD

La feuille de cuivre et de molybdène de CTIA GROUP LTD est un document d'orientation qui fournit des informations de sécurité pour la production, le transport, le stockage et l'utilisation du matériau, visant à garantir que les travailleurs, le personnel d'urgence et les utilisateurs comprennent ses caractéristiques, ses dangers potentiels et ses exigences de fonctionnement en toute sécurité.

La feuille de cuivre-molybdène est un matériau métallique composite composé de molybdène (n° CAS : 7439-98-7) et de cuivre (n° CAS : 7440-50-8). Le nom du produit est généralement choisi en fonction du rapport de composition, par exemple Mo85Cu15 (85 % molybdène, 15 % cuivre) ou Mo60Cu40 (60 % molybdène, 40 % cuivre). Ses principales utilisations comprennent les substrats de dissipation thermique pour les boîtiers électroniques, les composants de gestion thermique aérospatiale et les composants conducteurs de modules de puissance. Il est recommandé d'éviter une utilisation prolongée dans des environnements acides fortement oxydants (comme l'acide nitrique) ou oxygénés à haute température afin de prévenir la corrosion ou l'oxydation de la phase cuivre.

Dans des conditions normales d'utilisation, les feuilles de cuivre-molybdène sont des plaques massives et ne sont pas classées comme produits chimiques dangereux. Cependant, leur traitement (coupe,

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

meulage et soudage, par exemple) peut produire de la poussière ou des fragments métalliques, présentant des risques pour la santé et la sécurité. L'inhalation de poussières peut provoquer une légère irritation respiratoire, et un contact prolongé peut provoquer une gêne pulmonaire ; le contact cutané avec des fragments métalliques peut provoquer une irritation mécanique ou des coupures. Concernant l'environnement, les feuilles de cuivre-molybdène sont des matériaux inertes et ne pollueront pas significativement l'eau ou les sols. Cependant, les déchets doivent être traités conformément à la réglementation locale. La classification SGH indique qu'il ne s'agit pas d'un produit chimique dangereux, mais des mesures de protection doivent être prises lors de son traitement.

Traitement d'urgence : Pour les poussières ou débris générés pendant le traitement, la zone affectée doit être isolée et nettoyée avec un équipement anti-poussière (tel qu'un aspirateur) afin d'éviter toute poussière. Les matériaux collectés doivent être placés dans des conteneurs hermétiques et manipulés conformément à la réglementation. Le personnel de nettoyage doit porter des masques anti-poussière et des gants. Il est recommandé de couper, meuler ou souder dans un endroit bien ventilé pendant l'opération, d'utiliser un équipement de dépoussiérage local et de porter des lunettes de protection, des gants et un masque anti-poussière. Lors du stockage, les feuilles de cuivre-molybdène doivent être stockées dans un environnement sec et frais, éviter tout contact avec des acides oxydants forts ou des environnements contenant de l'oxygène à haute température, et être correctement emballées pour éviter l'humidité ou les dommages mécaniques.

Français Le contrôle de l'exposition exige que des systèmes d'aspiration localisée soient installés dans les zones de traitement afin de maintenir les concentrations de poussière en dessous des limites d'exposition professionnelle (telles que ACGIH TLV : 10 mg/m³ pour la poussière de molybdène et 1 mg/m³ pour la poussière de cuivre). L'équipement de protection individuelle comprend des masques anti-poussière N95 ou de qualité supérieure, des lunettes de protection et des gants résistants à l'usure. Une exposition à long terme nécessite des contrôles de santé réguliers. Les propriétés physiques et chimiques des feuilles de cuivre-molybdène varient en fonction du rapport de composition. Par exemple, la densité de Mo85Cu15 est d'environ 10,0 g/cm³, la conductivité thermique est d'environ 160-180 W/m·K et le coefficient de dilatation thermique est d'environ 5-7×10⁻⁶/K ; la densité du Mo60Cu40 est d'environ 9,6 g/cm³, la conductivité thermique est d'environ 210-250 W/m·K et le coefficient de dilatation thermique est d'environ 10-11×10⁻⁶/K. Le matériau est un solide métallique gris argenté, inodore, insoluble dans l'eau et chimiquement stable.

Dans des conditions normales, les feuilles de cuivre-molybdène sont chimiquement stables et ne réagissent pas avec l'eau, l'air ou les produits chimiques courants. Cependant, dans un environnement oxygéné à haute température, la phase cuivre peut générer de l'oxyde de cuivre et la phase molybdène peut générer des oxydes volatils. Tout contact avec des acides oxydants forts doit être évité afin d'empêcher la dissolution de la phase cuivre, et les poussières de traitement doivent être maintenues à l'écart des sources d'incendie. Sur le plan toxicologique, les feuilles de cuivre-molybdène solides ne présentent aucune toxicité significative, et la poussière peut provoquer une légère irritation respiratoire ou cutanée. L'inhalation prolongée de poussières à forte concentration peut provoquer une gêne pulmonaire. D'un point de vue écologique, les feuilles de cuivre-molybdène ne provoquent pas de bioaccumulation ni de pollution environnementale, et les déchets doivent être recyclés ou éliminés

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

conformément à la réglementation, notamment conformément à la Loi chinoise sur la prévention et le contrôle de la pollution environnementale par les déchets solides.

Pendant le transport, les feuilles de cuivre-molybdène ne sont pas des marchandises dangereuses et ne nécessitent aucune exigence particulière. Elles doivent cependant être correctement emballées pour éviter tout dommage mécanique, dans des caisses en bois robustes ou des conteneurs en plastique munis d'une fiche de données de sécurité (FDS). En termes de réglementation, les matériaux sont conformes à la réglementation chinoise sur la gestion de la sécurité des produits chimiques dangereux et aux normes internationales SGH, et doivent respecter les réglementations en matière de sécurité et de santé au travail. Les exportations sont conformes aux normes REACH et RoHS de l'UE.



Image de la feuille de cuivre et de molybdène CTIA GROUP LTD

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

CTIA GROUP LTD

Molybdenum Copper Sheets Introduction

1. Overview of Molybdenum Copper Sheets

Molybdenum-copper (Mo-Cu) sheets are composite materials composed of molybdenum and copper. Thanks to their unique combination of thermal, electrical, and mechanical properties, as well as their tunability, Mo-Cu sheets are widely used in fields such as thermal management, high-performance electronic devices, semiconductors, and aerospace. They are commonly utilized as packaging materials, integrated circuit substrates, heat sinks, and LED thermal dissipation substrates. At CTIA GROUP LTD, we can customize molybdenum-copper products with specific dimensions and compositions according to customer requirements.

2. Features of Molybdenum Copper Sheets

Excellent Electrical Conductivity: Suitable for applications requiring efficient electrical connections.

High Thermal Conductivity: Capable of rapid heat transfer, ideal for electronic devices that require effective thermal dissipation.

Low Coefficient of Thermal Expansion: Highly compatible with semiconductor materials like silicon, helping to minimize thermal stress caused by temperature fluctuations and preventing deformation or damage to components.

Good Workability: Can be processed through cutting and other techniques into parts of various sizes and shapes to meet diverse application needs.

3. Typical Properties of Molybdenum-Copper Alloys

Material Composition	Density (g/cm ³)	Thermal Conductivity (W/M·K at 25°C)	Thermal Expansion Coefficient (10 ⁻⁶ /°C)
Mo85Cu15	10.00	160-180	6.8
Mo80Cu20	9.90	170-190	7.7
Mo70Cu30	9.80	180-200	9.1
Mo60Cu40	9.66	210-250	10.3
Mo50Cu50	9.54	230-270	11.5

4. Production Method of Molybdenum Copper Sheets

The preparation of molybdenum-copper sheets is primarily carried out using the infiltration method, which takes advantage of molybdenum's high melting point and copper's excellent fluidity. In this process, copper is infiltrated into a molybdenum preform at high temperatures, resulting in the formation of a dense molybdenum-copper composite material.

5. Purchasing Information

Email: sales@chinatungsten.com; Phone: +86 592 5129595; 592 5129696

Website: molybdenum-copper.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 3 Classification des feuilles de cuivre et de molybdène

3.1 Classification par marque (typique) Tôle de cuivre et de molybdène

La classification des tôles de cuivre et de molybdène repose principalement sur leur rapport de composition, c'est-à-dire le pourcentage massique ou volumique de molybdène (Mo) et de cuivre (Cu). Les différentes nuances correspondent à des caractéristiques de performance spécifiques pour répondre aux besoins variés des applications électroniques, aérospatiales, de gestion thermique et de conductivité. La dénomination de la nuance est généralement directement liée à la teneur en molybdène et en cuivre. Par exemple, Mo85Cu15 signifie 85 % de molybdène et 15 % de cuivre. En ajustant le rapport molybdène-cuivre, la conductivité thermique, la conductivité électrique, le coefficient de dilatation thermique et les propriétés mécaniques peuvent être optimisés.

3.1.1 Mo85Cu15

Le Mo85Cu15 est une nuance à forte teneur en molybdène, composée de 85 % de molybdène et de 15 % de cuivre. Il se caractérise principalement par une résistance mécanique élevée, un faible coefficient de dilatation thermique et une excellente résistance aux températures élevées. Sa masse volumique est d'environ 10,0 g/cm³, proche de celle du molybdène. Sa conductivité thermique est d'environ 1,6 à 180 W/m·K, sa conductivité électrique d'environ 20 à 25 % IACS et son coefficient de dilatation thermique d'environ 5 à 7 × 10⁻⁶ /K, ce qui le rend parfaitement compatible avec les matériaux céramiques. Le Mo85Cu15 présente d'excellentes propriétés mécaniques, une dureté Vickers d'environ 180 à 220 HV et une résistance à la traction de près de 600 MPa, ce qui le rend adapté aux applications soumises à de fortes contraintes. Grâce à sa forte teneur en molybdène, il présente une excellente résistance aux températures élevées et peut fonctionner de manière stable dans un environnement de 600 à 800 °C. Il présente une forte résistance à la corrosion et à l'oxydation et convient aux composants haute température de l'industrie aérospatiale (tels que les composants de gestion thermique des réacteurs), aux échangeurs de chaleur de l'industrie nucléaire et aux substrats de dissipation thermique des semi-conducteurs de puissance. Le Mo85Cu15 présente une ductilité et une ténacité faibles, et est légèrement plus difficile à usiner. Il est souvent produit par pressage à chaud et frittage pour garantir une densité élevée. Il convient aux applications exigeant un contrôle strict de la dilatation thermique et une stabilité à haute température.

3.1.2 Mo80Cu20

Le Mo80Cu20 est une nuance présentant un rapport molybdène/ cuivre relativement équilibré, avec 80 % de molybdène et 20 % de cuivre, offrant un bon compromis entre résistance, conductivité thermique et dilatation thermique. Sa masse volumique est d'environ 9,9 g/cm³, sa conductivité thermique d'environ 170-200 W/m·K, sa conductivité électrique d'environ 25-30 % IACS et son coefficient de dilatation thermique d'environ 6-8×10⁻⁶/K, ce qui est comparable à celui des matériaux céramiques, mais légèrement supérieur à celui du Mo85Cu15. Les propriétés mécaniques du Mo80Cu20 sont légèrement inférieures à celles du Mo85Cu15, avec une dureté Vickers d'environ 160-200 HV et une résistance à la traction d'environ 500-600 MPa. Sa ductilité et sa ténacité sont améliorées, ce qui le rend adapté aux applications exigeant des performances de traitement spécifiques. Il présente une bonne résistance aux

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

hautes températures et peut fonctionner de manière stable dans un environnement de 500 à 700 °C. Il présente une excellente résistance à la corrosion et à l'oxydation et convient aux substrats de dissipation thermique, aux dissipateurs thermiques de dispositifs micro-ondes et aux pièces structurales aérospatiales pour les boîtiers électroniques. Le Mo80Cu20 est produit par métallurgie des poudres ou par infiltration en fusion. Cette méthode permet d'optimiser la distribution des phases du cuivre, d'améliorer la conductivité thermique et électrique, et est largement utilisée dans les applications exigeant une gestion thermique et des propriétés mécaniques rigoureuses.

3.1.3 Mo70Cu30

Le Mo70Cu30 est une nuance à forte teneur en cuivre, avec 70 % de molybdène et 30 % de cuivre. Ses principaux avantages sont une conductivité thermique et électrique élevée, et il convient à une gestion thermique efficace et aux applications conductrices. Sa masse volumique est d'environ 9,6 g/cm³, proche de celle du cuivre (8,96 g/cm³), sa conductivité thermique est d'environ 200-250 W/ m·K, sa conductivité électrique est d'environ 30-40 % IACS, et son coefficient de dilatation thermique est d'environ 8-10×10⁻⁶/K, supérieur aux deux précédents. Il convient aux applications où les exigences en matière de dilatation thermique sont moins strictes. Les propriétés mécaniques du Mo70Cu30 sont faibles, avec une dureté Vickers d'environ 120-160 HV et une résistance à la traction d'environ 400-500 MPa. Cependant, sa ductilité et sa ténacité sont nettement améliorées. Il est facile à usiner et à façonner, ce qui le rend idéal pour la fabrication de dissipateurs thermiques ou de pièces conductrices de formes complexes. Sa résistance aux hautes températures est légèrement inférieure, et la température de fonctionnement recommandée est inférieure à 400 °C afin d'éviter le ramollissement ou l'oxydation de la phase cuivre. Sa résistance à la corrosion et à l'oxydation est légèrement inférieure à celles du Mo85Cu15 et du Mo80Cu20. Il convient aux composants de gestion thermique des équipements de communication 5G, des modules de puissance et des véhicules à énergies nouvelles. Le Mo70Cu30 est souvent produit par infiltration en fusion afin d'assurer une répartition uniforme de la phase cuivre et d'optimiser la conductivité thermique et les performances de contact électrique.

3.1.4 Mo60Cu40

au molybdène à haute teneur en cuivre, composée de 60 % de molybdène et de 40 % de cuivre. Ses principales caractéristiques sont une excellente conductivité thermique et électrique, et elle convient à une gestion thermique efficace et aux applications conductrices. Sa densité est d'environ 9,3 g/cm³, proche de celle du cuivre (8,96 g/cm³), et sa conductivité thermique est relativement élevée, d'environ 200 à 250 W/ m·K, sa conductivité électrique est d'environ 30 à 40 % IACS, et son coefficient de dilatation thermique est d'environ 8 à 10×10⁻⁶/K, ce qui convient aux applications où les exigences de dilatation thermique sont relativement faibles. Le Mo60Cu40 présente des propriétés mécaniques modérées, avec une dureté Vickers d'environ 100 à 140 HV et une résistance à la traction d'environ 350 à 450 MPa. Comparé aux nuances à forte teneur en molybdène, sa ductilité et sa ténacité sont nettement améliorées. Il est facile à usiner et à former, ce qui le rend idéal pour la fabrication de dissipateurs thermiques, de substrats conducteurs ou de connecteurs aux formes complexes. Sa résistance aux hautes températures est limitée par sa teneur en cuivre. La température de fonctionnement recommandée est inférieure à 400 °C afin d'éviter le ramollissement ou l'oxydation de la phase cuivre. Sa résistance à la

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

corrosion et à l'oxydation est légèrement inférieure à celle des nuances à forte teneur en molybdène, mais il est stable dans des environnements chimiques non agressifs. Le Mo60Cu40 est largement utilisé dans les composants de gestion thermique des équipements de communication 5G, des modules semi-conducteurs de puissance et des véhicules à énergies nouvelles, notamment dans les applications exigeant une conductivité thermique élevée et des performances de traitement optimales. L'infiltration est son procédé de préparation courant, qui permet d'assurer une répartition uniforme de la phase cuivre et d'optimiser la conductivité thermique et les performances de contact électrique. La métallurgie des poudres peut également être utilisée pour la production, mais une densité élevée doit être garantie pour maintenir les performances.

3.1.5 Mo50Cu50

Nuance de tôle de cuivre au molybdène présentant la plus forte teneur en cuivre, le molybdène et le cuivre représentant chacun 50 %. Ses principaux avantages sont une conductivité thermique et électrique extrêmement élevée, proche de celle du cuivre pur, tout en conservant une certaine résistance mécanique et une stabilité thermique. Sa densité est d'environ 9,1 g/cm³, très proche de celle du cuivre. Sa conductivité thermique est d'environ 220-270 W/ m·K, sa conductivité électrique d'environ 35-45 % IACS et son coefficient de dilatation thermique d'environ 10-12×10⁻⁶/K, ce qui convient aux applications nécessitant peu de contrôle de la dilatation thermique. Les propriétés mécaniques du Mo50Cu50 sont généralement flexibles, avec une dureté Vickers d'environ 80-120 HV et une résistance à la traction d'environ 300-400 MPa. Sa ductilité et sa ténacité sont proches de celles du cuivre pur, ce qui le rend adapté aux techniques de traitement complexes telles que l'emboutissage ou le pliage. Sa faible résistance aux hautes températures est recommandée à une température de fonctionnement inférieure à 350 °C afin d'éviter le ramollissement ou l'oxydation de la phase cuivre à haute température. Sa résistance à la corrosion et à l'oxydation est encore plus faible que celle du Mo60Cu40, et il est nécessaire d'éviter une utilisation prolongée dans des environnements humides ou chlorés. Le Mo50Cu50 est principalement utilisé pour les substrats de dissipation thermique des dispositifs électroniques de forte puissance, les composants conducteurs des dispositifs micro-ondes et les modules de puissance des véhicules à énergies nouvelles. Il est particulièrement adapté aux applications nécessitant une conduction thermique et une transmission électrique efficaces. La méthode de préparation par infiltration en fusion est privilégiée, car elle permet d'optimiser la continuité de la phase cuivre et d'améliorer la conductivité thermique et électrique ; la métallurgie des poudres peut également être utilisée, mais la porosité doit être strictement contrôlée pour garantir des performances stables.

Feuilles de cuivre et de molybdène par procédé de fabrication

Les tôles de cuivre et de molybdène ont un impact significatif sur leurs performances, leur microstructure et leurs applications, notamment la métallurgie des poudres et l'infiltration en fusion. Différents procédés influencent la conductivité thermique, la conductivité électrique, les propriétés mécaniques et la stabilité chimique en contrôlant le mode de liaison du molybdène et du cuivre ainsi que la densité du matériau. Les caractéristiques et les applications des tôles de cuivre et de molybdène fabriquées par métallurgie des poudres et infiltration en fusion sont décrites ci-dessous.

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

tôle de cuivre fabriquée par métallurgie des poudres

Les tôles de cuivre et de molybdène fabriquées par métallurgie des poudres sont préparées par mélange de poudre de molybdène et de poudre de cuivre, pressage et frittage à haute température. Elles conviennent à la production de tôles de cuivre et de molybdène de différentes compositions, telles que Mo85Cu15, Mo80Cu20 et Mo70Cu30. Le procédé consiste d'abord à mélanger les poudres de molybdène et de cuivre selon un rapport spécifique, à former une ébauche par pressage à froid ou à chaud, puis à fritter sous gaz inerte à haute température (tel que l'argon ou l'azote) pour fondre partiellement la phase cuivre et combler les pores entre les particules de molybdène afin de former une structure composite dense. Les tôles de cuivre et de molybdène fabriquées par métallurgie des poudres présentent une résistance mécanique élevée. La résistance à la traction du Mo85Cu15 peut atteindre 500-600 MPa, et la dureté Vickers est d'environ 180-220 HV. Ils conviennent aux composants aérospatiaux haute résistance et haute température, ainsi qu'aux substrats de dissipation thermique pour boîtiers électroniques. Leur conductivité thermique augmente avec la teneur en cuivre. Le Mo70Cu30, par exemple, peut atteindre 200 à 250 W/ m·K, et sa conductivité électrique est d'environ 30 à 40 % IACS. La métallurgie des poudres permet un contrôle précis de la proportion des ingrédients et convient à la production sur mesure. Cependant, une température ou une pression de frittage insuffisante peut entraîner la formation de micropores, réduisant légèrement la conductivité thermique et électrique. Les feuilles de cuivre-molybdène produites par métallurgie des poudres sont largement utilisées dans les semi-conducteurs de puissance, les dispositifs à micro-ondes et les composants de gestion thermique, en particulier dans les applications exigeant une résistance élevée et des dimensions précises. Cependant, leur coût de traitement est élevé et elles conviennent aux applications hautes performances.

Feuille de molybdène-cuivre fabriquée par infiltration en fusion

La tôle de cuivre et de molybdène fabriquée par infiltration en fusion est formée en préparant d'abord un squelette poreux en molybdène, puis en y infiltrant du cuivre fondu pour former un matériau composite. Elle convient à la production de nuances à forte teneur en cuivre, telles que Mo60Cu40 et Mo50Cu50. Le procédé consiste d'abord à presser et à fritter de la poudre de molybdène par métallurgie des poudres pour former un squelette poreux en molybdène, puis à infiltrer du cuivre fondu dans les pores du squelette à haute température, formant ainsi une structure biphasée uniforme après refroidissement. La tôle de cuivre et de molybdène fabriquée par infiltration en fusion présente d'excellentes conductivités thermique et électrique. La conductivité thermique du Mo60Cu40 peut atteindre 200-250 W/ m·K, et la conductivité électrique est d'environ 30-40 % IACS. Le Mo50Cu50 présente une conductivité thermique proche de 220-270 W/ m·K et une teneur en IACS de 35-45 %, ce qui le rend adapté à une gestion thermique efficace et à des applications conductrices, telles que les équipements de communication 5G et les modules d'alimentation des véhicules à énergie nouvelle. Ses propriétés mécaniques sont légèrement inférieures à celles des produits issus de la métallurgie des poudres. La résistance à la traction du Mo60Cu40 est d'environ 350-450 MPa et sa dureté Vickers d'environ 100-140 HV. Cependant, sa ductilité et sa ténacité sont supérieures, ce qui facilite l'usinage de formes complexes. La méthode d'infiltration par fusion optimise la conductivité thermique et les performances de contact électrique grâce à une distribution uniforme des phases de cuivre. Cependant, une porosité du squelette de molybdène mal maîtrisée peut entraîner des irrégularités locales des phases de cuivre et affecter la

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

stabilité des performances. Le coût des feuilles de cuivre-molybdène produites par la méthode d'infiltration par fusion est relativement faible, convient à la production en série et est largement utilisé dans les radiateurs électroniques et les substrats conducteurs.

3.3 Classification des tôles de cuivre et de molybdène par domaine d'application

Les tôles de cuivre-molybdène peuvent être classées en tôles à usage général et tôles à usage spécifique (comme l'aérospatiale ou le conditionnement électronique) selon les besoins du domaine d'application. La classification des domaines d'application repose sur l'adéquation des propriétés des matériaux et des scénarios d'utilisation. Les tôles de cuivre-molybdène à usage général sont largement utilisées dans divers secteurs grâce à leurs performances équilibrées. Les caractéristiques et les applications de ces tôles sont décrites en détail ci-dessous.

3.3.1 Feuille de cuivre-molybdène générale

La tôle de cuivre-molybdène à usage général est un produit standardisé répondant aux besoins de diverses industries, comprenant généralement des nuances telles que Mo80Cu20, Mo70Cu30 et Mo60Cu40. Elle présente un équilibre entre conductivité thermique, conductivité électrique, propriétés mécaniques et caractéristiques de dilatation thermique, et convient aux secteurs de l'électronique, des communications, de l'énergie et de l'industrie. Sa densité est comprise entre 9,3 et 9,8 g/cm³, sa conductivité thermique est d'environ 170 à 250 W/m·K, sa conductivité électrique est d'environ 25 à 40 % IACS et son coefficient de dilatation thermique est d'environ 6 à 10×10⁻⁶/K, ce qui lui permet de s'adapter parfaitement aux céramiques et aux matériaux semi-conducteurs (tels que l'alumine et le nitrure de silicium). Les propriétés mécaniques de la tôle de cuivre-molybdène à usage général sont modérées, avec une résistance à la traction d'environ 350 à 600 MPa et une dureté Vickers d'environ 100 à 200 HV. Sa ductilité et sa ténacité sont suffisantes pour supporter les traitements conventionnels tels que la découpe et l'emboutissage. Sa résistance aux températures élevées lui permet de supporter des environnements de travail de 400 à 700 °C, et sa résistance à la corrosion et à l'oxydation est stable dans les environnements non agressifs. La tôle universelle en cuivre-molybdène est produite par métallurgie des poudres ou par infiltration en fusion. La méthode d'infiltration en fusion est plus adaptée aux nuances à forte teneur en cuivre pour optimiser la conductivité thermique, tandis que la méthode par métallurgie des poudres est adaptée aux exigences de résistance élevée. Les applications typiques incluent les substrats de dissipation thermique dans les boîtiers électroniques, les dissipateurs thermiques des équipements de communication, les composants conducteurs des modules de puissance et les composants de gestion thermique des véhicules à énergies nouvelles. Sa flexibilité et sa rentabilité en font le matériau de choix pour les applications de gestion thermique et de conductivité, répondant aux besoins de tous les secteurs, de l'électronique grand public aux équipements industriels.

3.3.2 Feuille de cuivre-molybdène haute fréquence

Les feuilles de cuivre molybdène haute fréquence sont conçues pour les équipements électroniques haute fréquence. Elles répondent aux besoins des équipements micro-ondes, radiofréquences et de communication en matière de conductivité élevée, de faible dilatation thermique et d'excellente gestion

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

thermique. Les nuances à forte teneur en cuivre, telles que Mo60Cu40 ou Mo50Cu50, sont généralement choisies pour garantir une transmission électrique et une conduction thermique efficaces. Leur conductivité thermique est d'environ 200 à 270 W/ m·K et leur conductivité électrique est d'environ 30 à 45 % IACS, ce qui permet de réduire efficacement les pertes d'énergie et l'accumulation de chaleur lors de la transmission de signaux haute fréquence. Leur coefficient de dilatation thermique est d'environ 8 à 12×10^{-6} /K, ce qui convient aux céramiques ou aux matériaux semi-conducteurs (comme le nitrure d'aluminium) dans les dispositifs haute fréquence.

Haute fréquence sont de qualité moyenne, avec une résistance à la traction d'environ 300 à 450 MPa, une dureté Vickers d'environ 80 à 140 HV, une bonne ductilité et une prise en charge des usinages de formes complexes, tels que les dissipateurs thermiques de dispositifs micro-ondes ou les substrats d'antennes. La résistance aux hautes températures est limitée par la teneur en cuivre, et la température de fonctionnement recommandée est inférieure à 400 °C pour éviter l'oxydation de la phase cuivre. La résistance à la corrosion et la stabilité électrochimique sont bonnes dans les environnements conventionnels et conviennent aux stations de base de communication 5G, aux systèmes radar et aux équipements de communication par satellite. L'infiltration est le principal procédé de préparation, qui optimise la conductivité électrique et la conduction thermique grâce à une distribution uniforme de la phase cuivre. La métallurgie des poudres peut également être utilisée pour la production de composants de haute précision. Un traitement de surface (comme l'argenture) est souvent utilisé pour réduire davantage la résistance de contact et améliorer les performances haute fréquence. Les feuilles de cuivre au molybdène haute fréquence sont largement utilisées dans les amplificateurs de puissance RF, les circuits intégrés micro-ondes et les modules de communication pour garantir l'intégrité du signal et la stabilité thermique.

3.3.3 Feuille de cuivre et de molybdène pour l'aérospatiale

La tôle de cuivre molybdène de type aérospatial est spécialement conçue pour les environnements extrêmes du secteur aérospatial. Elle se caractérise par une résistance élevée, une faible dilatation thermique et une excellente résistance aux températures élevées. Les nuances à forte teneur en molybdène, telles que Mo85Cu15 ou Mo80Cu20, sont généralement sélectionnées pour résister aux températures et aux contraintes élevées. Sa masse volumique est d'environ 9,8 à 10,0 g/cm³, sa conductivité thermique d'environ 150 à 200 W/ m·K, sa conductivité électrique d'environ 20 à 30 % IACS et son coefficient de dilatation thermique d'environ 5 à 8×10^{-6} /K, ce qui lui permet de s'adapter parfaitement aux matériaux céramiques et de réduire les contraintes interfaciales lors des cycles thermiques. Les tôles de cuivre-molybdène destinées à l'aéronautique présentent d'excellentes propriétés mécaniques, une résistance à la traction d'environ 500 à 600 MPa et une dureté Vickers d'environ 160 à 220 HV. Elles sont adaptées à la résistance aux charges mécaniques et aux vibrations, ainsi qu'à une excellente résistance aux hautes températures. Elles offrent un fonctionnement stable dans des environnements de 600 à 800 °C, une forte résistance à l'oxydation et à la corrosion et sont adaptées à l'environnement chimique agressif des dispositifs aéronautiques. Le pressage à chaud et le frittage constituent le principal procédé de préparation, garantissant une densité et une résistance d'interface élevées. L'infiltration de matière fondue peut également être utilisée pour certaines pièces afin d'équilibrer coût et performances. Les tôles de cuivre-molybdène destinées à l'aéronautique sont largement utilisées dans les composants de gestion thermique

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

des réacteurs, les dissipateurs thermiques des satellites et les modules de puissance des engins spatiaux. Elles maintiennent leurs performances dans des environnements à haute température, à fortes vibrations et sous vide, garantissant ainsi la fiabilité et la longévité des équipements.

3.3.4 Dispositif photoélectrique de type feuille de cuivre et de molybdène

La feuille de cuivre molybdène pour dispositifs optoélectroniques est conçue pour les dispositifs optoélectroniques (tels que les lasers, les LED et les modules de communication optique). Elle répond aux exigences de conductivité thermique élevée, de faible dilatation thermique et de performances de contact électrique. Les nuances Mo70Cu30 ou Mo60Cu40 sont généralement choisies pour équilibrer conductivité thermique et dilatation thermique. Sa conductivité thermique est d'environ 200-250 W/m·K et sa conductivité électrique d'environ 30-40 % IACS. Elle permet de dissiper rapidement la chaleur et de protéger les dispositifs optoélectroniques des dommages thermiques. Son coefficient de dilatation thermique est d'environ $8-10 \times 10^{-6}/K$, ce qui le rend compatible avec les matériaux optoélectroniques (tels que l'arséniure de gallium et le nitrure de silicium) et réduit les défaillances dues aux contraintes thermiques. Les propriétés mécaniques de la feuille de cuivre-molybdène pour dispositifs optoélectroniques sont modérées, avec une résistance à la traction d'environ 350 à 500 MPa et une dureté Vickers d'environ 100 à 160 HV. Sa ductilité permet un usinage de précision et convient à la fabrication de petits substrats ou électrodes à dissipation thermique. Sa résistance aux hautes températures est modérée, et la température de fonctionnement recommandée est inférieure à 400 °C. Sa résistance à la corrosion et sa stabilité électrochimique répondent aux besoins des dispositifs optoélectroniques en environnements conventionnels.



Image de la feuille de cuivre et de molybdène CTIA GROUP LTD

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

Chapitre 4 Technologie de préparation des feuilles de cuivre et de molybdène

4.1 Préparation de tôles de cuivre et de molybdène par la technologie de la métallurgie des poudres

La métallurgie des poudres est l'un des principaux procédés de préparation des tôles de cuivre et de molybdène. Elle permet de produire des tôles de cuivre et de molybdène de différentes compositions, telles que Mo85Cu15, Mo80Cu20 et Mo70Cu30. Le contrôle précis du mélange, du pressage et du frittage des poudres de molybdène et de cuivre permet d'obtenir d'excellentes propriétés mécaniques, thermiques et électriques. Cette technologie transforme les poudres métalliques en matériaux composites denses pour répondre aux besoins des secteurs de l'emballage électronique, de l'aérospatiale et de la gestion thermique .

4.1.1 Flux de processus de la technologie de la métallurgie des poudres

Molybdène fabriquées par la technologie de la métallurgie des poudres comprennent les étapes de préparation de la poudre, de mélange, de pressage, de frittage et de post-traitement.

Tout d'abord, des poudres de molybdène de haute pureté (généralement $\geq 99,95\%$) et de cuivre (généralement $\geq 99,9\%$) sont sélectionnées et tamisées afin d'assurer une granulométrie uniforme et d'améliorer l'effet de mélange. Les poudres sont mélangées uniformément dans un mélangeur mécanique selon le ratio cible (par exemple, Mo85Cu15 ou Mo70Cu30), et une faible quantité de lubrifiant (par exemple, de l'acide stéarique) est souvent ajoutée pour améliorer les performances de pressage. La poudre mélangée est pressée dans un moule par pressage à froid ou par pressage isostatique, sous une pression généralement comprise entre 100 et 300 MPa, pour former un corps cru d'une certaine résistance. Le corps cru est ensuite fritté dans un four de frittage haute température (1 000 à 1 400 °C) sous protection de gaz inerte (tel que l'argon ou l'azote) ou d'hydrogène. La phase de cuivre fond partiellement et remplit les pores entre les particules de molybdène pour former une structure composite molybdène-cuivre dense. Le temps de frittage est généralement de 2 à 6 heures, selon la composition et les conditions de l'équipement. La feuille de cuivre-molybdène frittée peut subir un post-traitement, par exemple un pressage à chaud pour augmenter la densité, ou un traitement mécanique (découpe, perçage) pour répondre aux exigences dimensionnelles. Le produit final peut subir un traitement de surface (nickelage ou dorure, par exemple) selon les besoins pour améliorer la résistance à l'oxydation et les performances de contact électrique.

L'ensemble du processus peut contrôler avec précision le rapport molybdène/cuivre, ce qui le rend adapté aux applications hautes performances telles que les composants aérospatiaux à haute température et les substrats de dissipation thermique électronique.

4.1.2 Avantages et limites de la technologie de la métallurgie des poudres

La métallurgie des poudres présente des avantages significatifs pour la préparation de tôles molybdène-cuivre, mais elle présente également certaines limites. Elle permet notamment de contrôler avec précision le rapport molybdène/ cuivre et de produire des nuances diversifiées, telles que Mo85Cu15 et Mo80Cu20,

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

répondant à différentes exigences de conductivité thermique et électrique (20-40 % IACS). Le procédé est très flexible et les propriétés du matériau peuvent être optimisées en ajustant la granulométrie de la poudre, la pression de pressage et la température de frittage. Par exemple, la résistance à la traction du Mo85Cu15 peut atteindre 500-600 MPa, ce qui est idéal pour les applications à haute résistance.

La métallurgie des poudres peut également atteindre une densité élevée (généralement $\geq 98\%$ de densité théorique), garantissant d'excellentes propriétés mécaniques et une efficacité de conductivité thermique, et convient aux domaines de l'emballage électronique et de l'aérospatiale.

De plus, cette technologie est adaptée à la production sur mesure en petites séries et permet de fabriquer des pièces aux formes complexes, telles que des dissipateurs thermiques pour dispositifs à micro-ondes. En termes de limitations, le coût de production de la métallurgie des poudres est relativement élevé, impliquant la préparation de poudres de haute pureté, des moules de précision et des équipements de frittage à haute température, avec une consommation énergétique et des coûts de maintenance élevés. Un processus de frittage mal contrôlé peut entraîner une mauvaise adhérence des micropores ou des interfaces, réduisant ainsi la conductivité thermique et électrique, en particulier pour les nuances à forte teneur en cuivre (comme Mo60Cu40). La métallurgie des poudres impose des exigences strictes en matière de qualité des poudres, et les impuretés ou la granulométrie irrégulière peuvent affecter la consistance du matériau. De plus, le frittage doit être réalisé sous atmosphère inerte ou réductrice, ce qui accroît la complexité du procédé. Par rapport à d'autres méthodes, la métallurgie des poudres est largement applicable dans la production de tôles de cuivre-molybdène hautes performances, mais elle est nécessaire pour équilibrer les coûts et les performances, et convient aux scénarios de haute précision et de haute fiabilité.

4.2.1 Déroulement du processus d'infiltration de matière fondue

Molybdène par infiltration en fusion comprend plusieurs étapes importantes. La première est la préparation de la feuille de molybdène et de la source de cuivre. La feuille de molybdène doit généralement être nettoyée avant utilisation afin d'éliminer les oxydes et impuretés de surface, ce qui contribue à assurer une bonne liaison du cuivre et du molybdène pendant le processus d'infiltration en fusion. La source de cuivre est généralement de la poudre de cuivre ou de la poudre d'alliage de cuivre. La poudre de cuivre sélectionnée présente une granulométrie appropriée pour mieux pénétrer dans les pores de la feuille de molybdène après fusion. Ensuite, la feuille de molybdène nettoyée et la source de cuivre sont placées dans un four à haute température et chauffées.

La température est progressivement augmentée jusqu'au point de fusion du cuivre (environ 1 083 °C) pour fondre complètement le cuivre. Le liquide de cuivre fondu pénètre dans les pores et les microfissures de la feuille de molybdène par capillarité, formant la base du matériau composite molybdène-cuivre. Lors du processus d'infiltration par fusion, le contrôle de la température et de la durée est crucial. En effet, une température ou une durée d'infiltration trop élevée peut entraîner une pénétration excessive du cuivre et affecter les propriétés physiques de la feuille de cuivre-molybdène. Il est donc crucial de maintenir la température d'infiltration par fusion entre 1 100 °C et 1 200 °C afin de garantir la profondeur et l'uniformité de la pénétration du cuivre.

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

Lorsque le liquide de cuivre pénètre complètement dans les pores de la feuille de molybdène, l'ensemble du système entre en phase de refroidissement. Durant ce processus, la combinaison cuivre-molybdène se stabilise progressivement pour former un matériau composite solide. À ce stade, le contrôle de la vitesse de refroidissement est également crucial, car un refroidissement rapide peut engendrer des contraintes internes dans le matériau, affectant ses propriétés mécaniques. Après refroidissement à température ambiante, la forme et les dimensions de la feuille de cuivre-molybdène sont pratiquement fixes. Enfin, afin de garantir la qualité de surface et la précision dimensionnelle de la feuille finale, un post-traitement est généralement nécessaire. Ces étapes comprennent l'élimination de l'excès de cuivre en surface, le meulage et le polissage du matériau, etc., afin d'améliorer le lissé et la précision dimensionnelle de la feuille. Si nécessaire, un traitement thermique peut également être effectué pour améliorer encore les propriétés mécaniques et la conductivité thermique de la feuille.

4.2.2 Avantages et limites de la méthode d'infiltration

La méthode d'infiltration par fusion présente des avantages considérables. Tout d'abord, son rendement est élevé et le cuivre et le molybdène peuvent être combinés rapidement pour former un matériau composite stable. Grâce à un contrôle précis de la profondeur de pénétration et de la répartition du cuivre, les différentes propriétés du matériau composite peuvent être optimisées, notamment en termes de conductivité thermique, de conductivité électrique et de résistance aux hautes températures. La méthode d'infiltration par fusion est très adaptable et permet d'ajuster la teneur en cuivre aux différents besoins industriels pour produire des feuilles de cuivre-molybdène aux propriétés variées. De plus, elle est adaptée à la production à grande échelle et aux exigences des applications industrielles. Elle est particulièrement adaptée aux équipements électroniques haute fréquence, à l'aérospatiale et aux composants électriques de forte puissance.

Cependant, la méthode d'infiltration présente également certaines limites. Premièrement, le contrôle de la température pendant le processus d'infiltration est crucial. Une température trop élevée ou une durée d'infiltration trop longue peut entraîner une pénétration excessive du cuivre, voire détruire la structure de la feuille de molybdène, affectant ainsi les performances du matériau. Deuxièmement, une profondeur de pénétration du cuivre mal contrôlée peut entraîner des irrégularités, rendant le matériau composite instable. De plus, pendant le processus d'infiltration, la volatilisation et la pénétration excessive du cuivre entraînent un gaspillage de matière et augmentent les coûts de production. De plus, ce procédé exige des équipements exigeants, notamment un four haute température et un système de contrôle précis de la température, ce qui augmente les investissements et complique l'exploitation. Par conséquent, malgré une efficacité de production élevée, la méthode d'infiltration impose des exigences très strictes en matière de contrôle du procédé et des équipements.

4.3 Application de la technologie d'impression 3D à la préparation de feuilles de cuivre et de molybdène

L'impression 3D offre de nouvelles possibilités pour la préparation de feuilles de molybdène-cuivre, notamment pour des formes complexes et une production sur mesure. Contrairement aux procédés traditionnels de moulage, de frittage et autres, l'impression 3D utilise un empilement couche par couche

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

pour fondre avec précision la poudre de molybdène-cuivre et la déposer couche par couche grâce à des technologies telles que la fusion laser ou par faisceau d'électrons, afin de créer des formes géométriques complexes et des structures fines. Ce procédé permet de contrôler avec précision la composition et la structure du matériau de chaque couche selon les exigences de conception, garantissant ainsi un contrôle précis des performances des matériaux composites molybdène-cuivre.

Lors de l'impression 3D, il faut d'abord mélanger des poudres de molybdène et de cuivre, généralement une poudre composite. Lors de l'impression, la poudre est chauffée à la température de fusion par un laser ou un faisceau d'électrons, puis le mélange molybdène-cuivre fondu s'accumule couche par couche sur la plateforme d'impression, formant progressivement une structure tridimensionnelle. Grâce à la grande flexibilité de la technologie d'impression 3D, il est possible de fabriquer des feuilles de molybdène-cuivre aux formes complexes et aux structures précises, particulièrement adaptées à la production en petites séries nécessitant un haut degré de personnalisation.

L'un des principaux avantages de la technologie d'impression 3D réside dans la possibilité de contrôler précisément la répartition des matériaux, améliorant ainsi leurs performances globales. Comparée aux méthodes traditionnelles, l'impression 3D permet d'économiser des matériaux, d'améliorer l'efficacité de la production et de réduire les déchets. Elle est particulièrement adaptée aux applications aux structures complexes et exigeant une précision élevée. De plus, elle permet d'ajuster la composition et la structure des matériaux en temps réel pendant la production, ce qui accroît la flexibilité de conception des feuilles de cuivre-molybdène.

Cependant, la technologie d'impression 3D présente également certaines limites. Premièrement, malgré une grande flexibilité, la vitesse d'impression est relativement lente, surtout en production à grande échelle, et peut ne pas être comparable aux procédés de fabrication traditionnels. Deuxièmement, les équipements utilisés pour l'impression 3D sont coûteux et nécessitent des compétences opérationnelles élevées. L'impression de matériaux composites molybdène-cuivre nécessitant des températures élevées et un environnement contrôlé avec précision, ces équipements doivent être hautement performants. De plus, la surface de la feuille molybdène-cuivre après impression 3D peut être rugueuse et nécessite des post-traitements, tels que le meulage et le polissage, pour obtenir un fini de surface et une précision dimensionnelle optimaux.

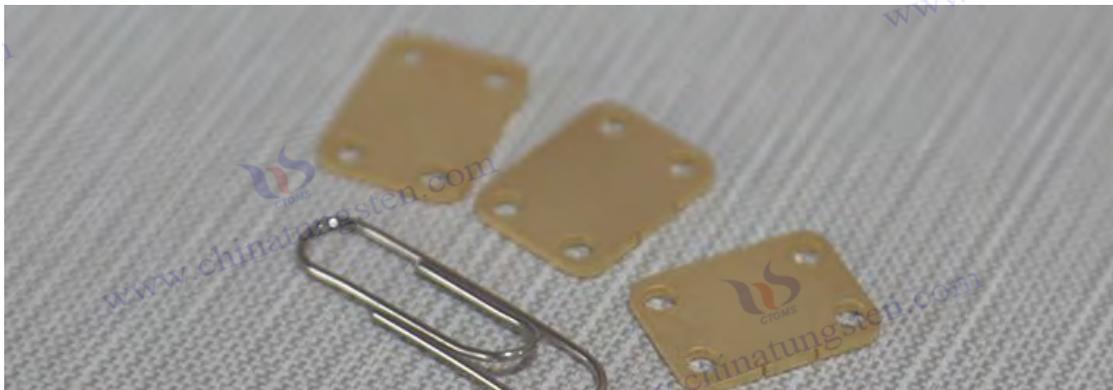


Image de la feuille de cuivre et de molybdène CTIA GROUP LTD

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

CTIA GROUP LTD

Molybdenum Copper Sheets Introduction

1. Overview of Molybdenum Copper Sheets

Molybdenum-copper (Mo-Cu) sheets are composite materials composed of molybdenum and copper. Thanks to their unique combination of thermal, electrical, and mechanical properties, as well as their tunability, Mo-Cu sheets are widely used in fields such as thermal management, high-performance electronic devices, semiconductors, and aerospace. They are commonly utilized as packaging materials, integrated circuit substrates, heat sinks, and LED thermal dissipation substrates. At CTIA GROUP LTD, we can customize molybdenum-copper products with specific dimensions and compositions according to customer requirements.

2. Features of Molybdenum Copper Sheets

Excellent Electrical Conductivity: Suitable for applications requiring efficient electrical connections.

High Thermal Conductivity: Capable of rapid heat transfer, ideal for electronic devices that require effective thermal dissipation.

Low Coefficient of Thermal Expansion: Highly compatible with semiconductor materials like silicon, helping to minimize thermal stress caused by temperature fluctuations and preventing deformation or damage to components.

Good Workability: Can be processed through cutting and other techniques into parts of various sizes and shapes to meet diverse application needs.

3. Typical Properties of Molybdenum-Copper Alloys

Material Composition	Density (g/cm ³)	Thermal Conductivity (W/M·K at 25°C)	Thermal Expansion Coefficient (10 ⁻⁶ /°C)
Mo85Cu15	10.00	160-180	6.8
Mo80Cu20	9.90	170-190	7.7
Mo70Cu30	9.80	180-200	9.1
Mo60Cu40	9.66	210-250	10.3
Mo50Cu50	9.54	230-270	11.5

4. Production Method of Molybdenum Copper Sheets

The preparation of molybdenum-copper sheets is primarily carried out using the infiltration method, which takes advantage of molybdenum's high melting point and copper's excellent fluidity. In this process, copper is infiltrated into a molybdenum preform at high temperatures, resulting in the formation of a dense molybdenum-copper composite material.

5. Purchasing Information

Email: sales@chinatungsten.com; Phone: +86 592 5129595; 592 5129696

Website: molybdenum-copper.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 Principaux équipements de production de tôles de cuivre et de molybdène

5.1 Équipement de production de technologie de métallurgie des poudres de feuilles de cuivre et de molybdène

La métallurgie des poudres est une méthode couramment utilisée pour la préparation des tôles molybdène-cuivre. Elle consiste principalement à former le composite molybdène-cuivre final en mélangeant de la poudre de molybdène et de la poudre de cuivre, puis en les pressant et en les frittant. Tout au long du processus de production, la qualité et l'uniformité de la poudre sont cruciales pour la performance de la tôle molybdène-cuivre. L'équipement de préparation de la poudre devient donc un maillon essentiel du processus de production.

5.1.1 Équipement de préparation de poudre

La première étape de la technologie de la métallurgie des poudres est la préparation de la poudre. Les équipements courants comprennent des broyeurs à boulets et des atomiseurs, qui permettent de transformer les matières premières de molybdène et de cuivre en poudres fines et uniformes. La qualité de la poudre influence directement la préparation ultérieure des feuilles de molybdène-cuivre ; il est donc essentiel de choisir le bon équipement de préparation.

5.1.1.1 Broyeur à boulets

Dans le domaine de la métallurgie des poudres, les broyeurs à boulets, équipements de préparation de poudres de base, occupent une place importante dans la production de matériaux composites molybdène-cuivre grâce à leurs performances efficaces et stables. Ces matériaux allient le point de fusion élevé et la faible dilatation du molybdène à la conductivité électrique et thermique élevées du cuivre. Largement utilisés dans des secteurs haut de gamme tels que l'emballage électronique et l'aérospatiale, les broyeurs à boulets constituent un équipement essentiel pour le traitement fin des poudres de matières premières. Le principe de fonctionnement du broyeur à boulets repose sur la dynamique et les effets mécano-chimiques. En fonctionnement, les billes de broyage internes (généralement en acier inoxydable, en oxyde de zirconium ou en carbure de tungstène) sont entraînées par un cylindre rotatif à grande vitesse pour former une trajectoire composite de chute, de glissement et de roulement. Lorsque les billes de broyage entrent en contact avec les poudres de molybdène et de cuivre, la force d'impact générée instantanément broie les particules grossières. Le frottement entre les billes et la paroi du cylindre broie davantage la poudre pour obtenir un raffinement des particules. Ce processus entraîne non seulement des modifications granulométriques, mais aussi une augmentation de l'activité de surface et du degré de distorsion du réseau, créant ainsi de bonnes conditions pour le frittage ultérieur.

Le contrôle précis des paramètres de procédé est au cœur de l'application des broyeurs à boulets. En prolongeant la durée de broyage, la granulométrie de la poudre peut être réduite de quelques dizaines de microns à un niveau submicronique, mais une durée trop longue peut entraîner une agglomération par soudage à froid. Le réglage de la vitesse de rotation (généralement contrôlée à 60-80 % de la vitesse critique) peut modifier le mode de déplacement des billes de broyage. Une vitesse de rotation élevée

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

améliore le concassage par impact, tandis qu'une vitesse de rotation faible se concentre sur le broyage et l'affinage. Le choix du matériau de broyage (rapport granulométrique, dureté du matériau, etc.) influence directement l'efficacité du broyage : les billes d'acier de grand diamètre sont propices au concassage grossier, tandis que les billes de zircone de petite granulométrie conviennent au broyage fin. Une entreprise a réduit la granulométrie moyenne d'une poudre composite molybdène-cuivre de 15 μm à 1,2 μm en optimisant les paramètres de broyage, améliorant ainsi considérablement la densité et la résistance de liaison de l'interface du matériau. Les avantages de cet équipement favorisent également son application à grande échelle. Les broyeurs à boulets industriels à grande échelle peuvent traiter jusqu'à plusieurs tonnes à la fois et, grâce au système d'alimentation automatique, ils peuvent répondre aux besoins de production à grande échelle ; sa conception modulaire facilite le remplacement et l'entretien des composants tels que le cylindre, la chemise et les billes de broyage, et présente une forte stabilité de fonctionnement.

Sur une ligne de production de matériaux d'emballage électronique en molybdène-cuivre, après 3 000 heures de fonctionnement continu du broyeur à boulets, la fluctuation granulométrique de la poudre est contrôlée à $\pm 5\%$, garantissant ainsi l'uniformité de la qualité du produit. De plus, le procédé de broyage à boulets est très tolérant à la forme des matières premières. Qu'il s'agisse de déchets en vrac ou de poudre de haute pureté, ces équipements peuvent être recyclés ou finement traités, ce qui est conforme au concept de fabrication verte et est devenu un équipement de base indispensable pour l'industrie de la métallurgie des poudres.

5.1.1.2 Équipement d'atomisation

L'équipement d'atomisation est un autre outil de préparation de poudre couramment utilisé, particulièrement adapté à la préparation des poudres d'alliages de cuivre et de molybdène. La méthode d'atomisation pulvérise le métal en fusion en fines gouttelettes, qui sont refroidies et solidifiées pour former une fine poudre métallique. Comparé aux broyeurs à boulets, l'équipement d'atomisation permet de produire des poudres plus uniformes, notamment en termes de granulométrie et de contrôle de la morphologie. La poudre atomisée présente une granulométrie plus fine et une bonne fluidité et dispersibilité, ce qui la rend particulièrement adaptée à l'usinage de précision et à la préparation de matériaux haute performance en métallurgie des poudres.

Les équipements d'atomisation comprennent généralement différents types, tels que l'atomisation au gaz et l'atomisation centrifuge. Choisir la bonne méthode d'atomisation peut améliorer efficacement la qualité de la poudre. L'équipement d'atomisation au gaz utilise un gaz haute pression pour pulvériser le métal en fusion en gouttelettes et obtenir une poudre fine après refroidissement. Cette méthode est particulièrement adaptée à la production de poudre d'alliage molybdène-cuivre, améliorant ainsi l'uniformité et la stabilité de la poudre, contribuant ainsi à optimiser les performances des tôles molybdène-cuivre produites ultérieurement.

L'avantage des équipements d'atomisation réside dans leur capacité à produire rapidement et efficacement une poudre métallique de haute qualité, adaptée à la production industrielle à grande échelle.

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

En ajustant précisément les paramètres du procédé d'atomisation, il est possible d'obtenir les propriétés de poudre souhaitées pour répondre aux besoins de production de différentes tôles molybdène-cuivre.

5.1.2 Équipement de moulage de poudre

Le moulage de poudre est une étape cruciale du procédé de métallurgie des poudres. Son objectif est de presser la poudre mixte molybdène-cuivre pour obtenir une ébauche à la forme et à la densité requises, sous l'action d'une force externe, préparant ainsi le frittage ultérieur. Les équipements de moulage de poudre les plus couramment utilisés comprennent les presses hydrauliques et les presses isostatiques.

5.1.2.1 Presse hydraulique (pour le formage à froid de billettes en molybdène-cuivre)

Les presses hydrauliques sont largement utilisées pour le pressage à froid en métallurgie des poudres, notamment pour la préparation des tôles de cuivre et de molybdène. La presse hydraulique assure une pression uniforme grâce au système hydraulique pour presser le mélange de poudre de cuivre et de molybdène afin d'obtenir une ébauche à la forme souhaitée. L'équipement assure une pression élevée pour assurer un bon contact entre les poudres, améliorant ainsi la densité et l'uniformité de l'ébauche. Lors du pressage à froid, la poudre de cuivre et de molybdène est placée dans le moule. La presse hydraulique applique une pression qui la comprime et la forme de l'ébauche. Le contrôle de la pression et du temps de formage est crucial et peut influencer la densité et la résistance de l'ébauche. L'avantage de la presse hydraulique est sa capacité à traiter de grandes quantités de poudre tout en garantissant une qualité stable de l'ébauche formée. L'application de la presse hydraulique ne se limite pas à la production de tôles en cuivre-molybdène, mais est également largement utilisée pour le moulage par poudre d'autres métaux et alliages. Cet équipement est facile à utiliser et à entretenir, adapté à la production continue et par lots, et répond aux besoins de la production industrielle.

5.1.2.2 Presse isostatique

La presse isostatique est un dispositif de moulage qui applique une pression statique uniforme sur les matériaux en poudre, et ce dans toutes les directions, afin de garantir l'uniformité et la densité de l'ébauche moulée. Le principal avantage de la presse isostatique est qu'elle permet d'augmenter efficacement la densité de l'ébauche et d'assurer une répartition uniforme des poudres de cuivre et de molybdène dans le composite molybdène-cuivre, améliorant ainsi la stabilité de la qualité lors du frittage ultérieur.

La poudre de molybdène-cuivre est moulée uniformément dans un moule fermé. Par pression hydraulique ou pneumatique, la poudre est soumise à une pression uniforme dans toutes les directions pour former une billette haute densité. Contrairement aux presses hydrauliques, les presses isostatiques appliquent une pression plus uniforme, ce qui permet d'obtenir des propriétés physiques plus homogènes dans toutes les directions, ce qui est particulièrement adapté à la production de tôles de molybdène-cuivre nécessitant une densité élevée. L'avantage de la presse isostatique est qu'elle permet d'atteindre une densité plus élevée à faible pression, ce qui est particulièrement adapté à certains produits exigeant une uniformité et une précision élevées. La presse isostatique garantit l'intégration complète de la poudre de

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

molybdène-cuivre pendant le formage, améliore la structure du matériau composite et, par conséquent, la qualité de la billette formée. Malgré un coût d'équipement relativement élevé, elle reste largement utilisée dans la production de produits de métallurgie des poudres haut de gamme grâce à son excellent effet de formage.

5.1.3 Équipement de frittage

Le frittage est la dernière étape du procédé de métallurgie des poudres. Il combine les particules métalliques de la poudre à haute température pour former un matériau composite molybdène-cuivre à structure dense. L'équipement de frittage joue un rôle clé dans l'ensemble du processus de production et influence les performances finales de la tôle molybdène-cuivre. Les équipements de frittage couramment utilisés comprennent les fours de frittage sous vide, les fours de frittage sous atmosphère, etc. Lors du frittage, la billette molybdène-cuivre formée est placée dans le four de frittage et chauffée à une température donnée pour permettre la diffusion et la liaison entre les particules de poudre de molybdène et de cuivre. Le contrôle de la température, de la durée et de l'atmosphère de frittage a une influence cruciale sur la qualité du frittage. À haute température, une réaction physique et chimique se produit à l'interface entre le molybdène et le cuivre, formant progressivement une liaison solide.

Les fours de frittage sous vide et les fours de frittage sous atmosphère sont les équipements de frittage les plus courants actuellement. Le four de frittage sous vide est principalement utilisé pour la production de tôles de cuivre-molybdène devant être frittées en milieu exempt d'oxygène, ce qui permet d'éviter les réactions d'oxydation et d'améliorer la qualité des matériaux. Le four de frittage sous atmosphère contrôlée est adapté au frittage sous atmosphère contrôlée. En ajustant la composition de l'atmosphère du four (azote, hydrogène, etc.), le processus de frittage du matériau et ses performances après frittage peuvent être efficacement contrôlés. Le choix de l'équipement de frittage doit être déterminé en fonction des exigences spécifiques de la tôle de cuivre-molybdène. Par exemple, le four de frittage sous vide est adapté aux produits soumis à des exigences strictes en matière d'oxydation et d'atmosphère, tandis que le four de frittage sous atmosphère est adapté à la production de tôles de cuivre-molybdène à grande échelle et performantes. En production industrielle, la stabilité et l'efficacité de l'équipement de frittage influencent directement le rendement et le coût de production du produit. Par conséquent, la sélection raisonnable de l'équipement de frittage est l'une des clés pour garantir la qualité des feuilles de cuivre au molybdène.

5.1.3.1 Four de frittage sous vide (utilisé pour le frittage à haute température, atmosphère contrôlée pour éviter l'oxydation)

Les fours de frittage sous vide sont largement utilisés pour la production de feuilles de cuivre et de molybdène, notamment lorsque le frittage est requis en atmosphère contrôlée ou sans oxygène. Le four de frittage sous vide crée un environnement proche du vide en extrayant l'air du four, évitant ainsi la réaction d'oxydation provoquée par le contact entre le métal et l'oxygène à haute température. Dans cet environnement, les matériaux à base de molybdène et de cuivre conservent leurs propriétés physiques et chimiques d'origine, évitent la formation de film d'oxyde et garantissent la conductivité électrique, la conductivité thermique et la résistance à haute température des feuilles de cuivre et de molybdène. Dans

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

le four de frittage sous vide, la température, la pression et la durée du processus de frittage sont contrôlées avec précision en fonction des propriétés du matériau et des exigences du produit. Sous vide, la température de frittage est généralement plus élevée, ce qui favorise la diffusion et la liaison entre les particules métalliques pour atteindre une densité et une résistance idéales. Le four de frittage sous vide permet également de régler l'atmosphère. En ajustant la composition des gaz dans le four (azote, hydrogène, etc.), la réaction pendant le frittage peut être mieux contrôlée afin d'améliorer les propriétés mécaniques et la qualité de surface des tôles de cuivre et de molybdène. L'avantage du four de frittage sous vide est qu'il prévient efficacement les réactions d'oxydation, améliore la pureté et la qualité des matériaux frittés et est particulièrement adapté à la production de tôles de cuivre et de molybdène soumises à des exigences strictes en matière d'oxydation. Il est largement utilisé dans l'aérospatiale, les équipements électroniques haut de gamme et la préparation de matériaux dans des environnements à haute température.

5.1.3.2 Four de frittage à chaud

Le four de frittage par pressage à chaud combine les deux procédés de pressage à chaud et de frittage. Il est adapté au frittage de feuilles de cuivre-molybdène nécessitant une pression simultanée à haute température. Contrairement aux méthodes de frittage traditionnelles, le four de frittage par pressage à chaud fournit non seulement de la chaleur pendant le frittage, mais applique également une certaine pression pour favoriser la liaison étroite entre les particules de poudre. Grâce à la pression, le four de frittage par pressage à chaud améliore la densité et les propriétés mécaniques du matériau, et est particulièrement adapté à la production de matériaux composites molybdène-cuivre haute densité et haute résistance. Le principe de fonctionnement du four de frittage par pressage à chaud consiste à placer la billette de poudre dans un moule, à appliquer une pression tout en chauffant, afin de déformer et de fusionner les particules de poudre de molybdène-cuivre à la température de frittage. Ce procédé permet d'obtenir une densité plus élevée et une distribution plus uniforme des particules, améliorant ainsi les performances globales du matériau. Le four de frittage par pressage à chaud est adapté aux produits exigeant une densité et une résistance particulièrement élevées, notamment dans les domaines haut de gamme tels que les composants électroniques de haute puissance et les matériaux aérospatiaux. Son avantage réside dans la possibilité d'atteindre une densité plus élevée en un temps plus court et de contrôler précisément l'effet de frittage en ajustant la pression et la température afin d'améliorer les propriétés physiques des tôles en molybdène-cuivre. Ses inconvénients résident dans la complexité relative de l'équipement et l'investissement élevé, mais il reste indispensable pour la production de tôles en molybdène-cuivre hautes performances.

5.1.4 Équipement de post-traitement

Les équipements de post-traitement jouent un rôle essentiel dans le processus de production des tôles de cuivre-molybdène. Ils servent principalement à améliorer les propriétés mécaniques, la qualité de surface et la précision de forme des tôles. Les équipements de post-traitement courants comprennent des fours de traitement thermique et des rectifieuses de précision, qui contribuent à améliorer les performances finales des tôles de cuivre-molybdène.

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

5.1.4.1 Four de traitement thermique

Les fours de traitement thermique sont utilisés dans le processus de traitement thermique des feuilles de cuivre-molybdène. Ils consistent principalement à chauffer et à contrôler la vitesse de refroidissement pour modifier la structure cristalline du matériau et ainsi améliorer sa dureté, sa résistance mécanique et sa résistance à l'usure. Ils utilisent généralement des systèmes de contrôle de température précis pour recuire, vieillir ou tremper les feuilles de cuivre-molybdène à une température donnée afin d'obtenir les propriétés physiques requises. Le rôle des fours de traitement thermique dans la production de feuilles de cuivre-molybdène est particulièrement important, notamment pour améliorer la structure interne des matériaux et éliminer les contraintes internes. Le traitement thermique permet de modifier efficacement la structure des feuilles de cuivre-molybdène, d'améliorer leurs propriétés mécaniques et de renforcer leur résistance à la dilatation thermique, à l'oxydation et à la corrosion en ajustant la température de chauffage et le temps de maintien. Le traitement thermique permet d'améliorer considérablement la densité, la dureté superficielle et la résistance à la fatigue des feuilles de cuivre-molybdène. Il existe de nombreux types de fours de traitement thermique, notamment les fours à caisson, les fours à fosse, les fours rotatifs, etc. La sélection d'un four de traitement thermique approprié peut garantir la stabilité et l'uniformité du processus de traitement thermique, améliorant ainsi la qualité et les performances des feuilles de cuivre au molybdène.

5.1.4.2 Rectifieuses de précision

Les meuleuses de précision sont utilisées pour la finition de surface des tôles de cuivre-molybdène, principalement pour éliminer les irrégularités et améliorer leur état. Elles utilisent des meules rotatives à grande vitesse pour meuler finement la surface des tôles de cuivre-molybdène, ce qui permet d'éliminer les aspérités et d'obtenir la précision dimensionnelle et la qualité de surface requises. Les meuleuses de précision jouent un rôle essentiel dans le post-traitement des tôles de cuivre-molybdène, notamment dans les applications exigeant une précision élevée, où elles permettent d'obtenir des résultats de traitement de surface de haute qualité. Elles garantissent non seulement une surface lisse et sans défaut, mais aussi des dimensions plus précises et répondent aux exigences techniques. Les meuleuses de précision offrent un large éventail d'applications, notamment la finition des contours, la rectification de surface et le rabotage des tôles de cuivre-molybdène. Grâce à leur traitement, les tôles de cuivre-molybdène atteignent une précision accrue et s'adaptent à des environnements de travail et des applications plus exigeants.

5.2 Équipement de production par infiltration de feuilles de molybdène et de cuivre

L'infiltration est une technologie importante dans la production de feuilles de molybdène-cuivre. Elle forme un matériau composite molybdène-cuivre par fusion du cuivre et infiltration dans les pores de la feuille. Dans ce procédé, le choix d'un équipement de production approprié a une influence décisive sur les performances et la qualité du matériau final. Les principaux équipements de production de la méthode d'infiltration comprennent des presses hydrauliques et des fours de frittage sous vide, utilisés respectivement pour le moulage de la poudre de molybdène et le frittage et l'infiltration de matériaux composites molybdène-cuivre.

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

5.2.1 Presse hydraulique (pour presser la poudre de molybdène en forme)

La presse hydraulique utilisée pour l'infiltration de tôles de cuivre et de molybdène est principalement utilisée pour presser la poudre de molybdène en forme initiale. La mise en forme de la poudre de molybdène est la première étape de l'infiltration, déterminant la qualité de l'infiltration ultérieure et de la tôle de cuivre et de molybdène finale. La presse hydraulique utilise une pression élevée pour presser la poudre de molybdène et obtenir une ébauche de forme et de densité spécifiques. L'équipement assure une pression stable, permettant une répartition uniforme de la poudre de molybdène dans le moule, obtenant ainsi une structure dense en molybdène.

L'avantage des presses hydrauliques réside dans la précision de leur contrôle de pression. La force et le temps de pressage peuvent être ajustés selon les besoins pour garantir la densité et l'uniformité de la poudre de molybdène brute. Le squelette de molybdène formé est ensuite acheminé vers l'étape suivante du processus d'infiltration. Les presses hydrauliques conviennent non seulement à la production de feuilles de cuivre molybdène, mais sont également largement utilisées pour le formage d'autres poudres métalliques. Elles présentent les avantages d'une utilisation simple, d'une grande stabilité et d'une grande efficacité de production.

5.2.2 Four de frittage sous vide (pour le frittage du squelette de molybdène et l'infiltration de cuivre)

Le four de frittage sous vide joue un rôle essentiel dans la méthode d'infiltration de feuilles de molybdène-cuivre. Il est principalement utilisé pour le frittage du squelette de molybdène et l'infiltration de cuivre. Une fois le squelette de molybdène formé, les particules de poudre de molybdène doivent être liées à une matrice dense de molybdène par un processus de frittage sous vide ou sous atmosphère spécifique afin de garantir la résistance mécanique et la stabilité structurelle du matériau composite molybdène-cuivre. Dans le four de frittage sous vide, le squelette de molybdène formé est d'abord placé dans le four et fritté à haute température. L'environnement sous vide permet d'empêcher efficacement la réaction du molybdène avec l'oxygène à haute température, d'éviter le processus d'oxydation et de maintenir la pureté et la stabilité du molybdène. Après le frittage, la source de cuivre (généralement de la poudre de cuivre ou de la poudre d'alliage de cuivre) est ajoutée au four, qui est ensuite fondu par chauffage. Le liquide de cuivre fondu commence à pénétrer dans les pores du squelette de molybdène pour former une structure composite molybdène-cuivre.

Le principal avantage du four de frittage sous vide réside dans la possibilité d'effectuer le frittage et l'infiltration dans un environnement sous vide strictement contrôlé, ce qui permet d'éviter efficacement les réactions d'oxydation et de garantir l'excellente performance des tôles molybdène-cuivre. Le four de frittage sous vide permet de contrôler précisément le processus de frittage en ajustant la température et la composition de l'atmosphère, optimisant ainsi la qualité finale des tôles molybdène-cuivre. Pour les matériaux en molybdène facilement oxydables à haute température, le four de frittage sous vide est un équipement essentiel pour garantir la production de matériaux composites molybdène-cuivre de haute qualité.

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

Chapitre 6 Méthodes et équipement d'essai des performances des feuilles de cuivre et de molybdène

6.1 Essai de densité de la feuille de cuivre et de molybdène

La densité est l'une des propriétés physiques importantes pour mesurer la qualité des [tôles de cuivre et de molybdène](#). Elle influence directement les propriétés mécaniques, la conductivité électrique et la conductivité thermique du matériau. La méthode de test de densité couramment utilisée est la méthode de drainage d'Archimède, une méthode de mesure simple et de haute précision, largement utilisée dans la production de tôles de cuivre et de molybdène.

6.1.1 Principe et fonctionnement de la méthode de drainage d'Archimède

La méthode du déplacement d'Archimède repose sur le principe de la poussée d'Archimède, selon lequel lorsqu'un objet est complètement immergé dans un liquide, il déplace un volume de liquide égal au volume de l'objet. En mesurant le volume déplacé par l'objet dans le liquide, on peut calculer sa masse volumique. Pour réaliser ce test, il faut d'abord une balance électronique et suffisamment de liquide (eau ou autre liquide approprié). La masse volumique du liquide doit être connue ; on utilise généralement de l'eau, dont la masse volumique est de 1 g/cm³. S'assurer que le liquide contenu dans le récipient est pur et exempt de bulles. Utilisez d'abord une balance électronique pour mesurer le poids sec de la feuille de cuivre-molybdène (la masse non immergée dans le liquide) et enregistrez la valeur. Immergez ensuite complètement la feuille de cuivre-molybdène dans le liquide, en vous assurant que l'objet ne soit pas en suspension ni ne présente de bulles. Pendant l'immersion, assurez-vous que la feuille de cuivre-molybdène est entièrement entourée de liquide pour éviter toute erreur. Une fois la feuille immergée, mesurez la masse flottante produite dans le liquide et enregistrez-la comme poids humide. Le volume de la feuille de cuivre-molybdène peut être calculé à l'aide de la formule suivante :

$$V = \frac{m_1}{\rho_{\text{liquide}}}$$

Parmi ces valeurs, m₁ représente le poids sec de la feuille de cuivre-molybdène, et ρ_{liquide} sa masse volumique. La formule de la masse volumique est :

$$\rho_{\text{cuivre}} = \frac{m_1}{V}$$

Grâce à cette méthode, le drainage d'Archimède permet de mesurer avec précision la densité de la feuille de cuivre-molybdène et d'éviter l'endommagement de l'échantillon. Il est particulièrement adapté aux tests de densité des matériaux métalliques.

6.2 Test de porosité d'une feuille de cuivre et de molybdène

La porosité est un indicateur important pour mesurer la microstructure interne des feuilles de cuivre-molybdène, affectant directement la résistance mécanique, la conductivité thermique et la conductivité électrique du matériau. Le test de porosité est réalisé par observation et calcul au microscope

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

métallographique, ce qui permet d'obtenir des résultats de mesure de haute précision. Cette méthode d'essai observe la microstructure de la surface des feuilles de cuivre-molybdène, identifie la présence et la répartition des pores et calcule la porosité.

6.2.1 Observation et calcul au microscope métallographique

La microscopie métallographique est une méthode d'analyse microscopique haute résolution permettant de révéler avec précision la microstructure des feuilles de cuivre-molybdène. Avant de réaliser le test de porosité, les échantillons de feuilles de cuivre-molybdène doivent être préparés. Les échantillons sont d'abord découpés pour obtenir des éprouvettes de taille appropriée. Ensuite, les éprouvettes sont polies métallographiquement afin de garantir que leurs surfaces sont lisses et planes, sans défauts ni rayures apparents, et donc parfaitement observables au microscope. Pendant le polissage, du papier de verre de différents grains est utilisé pour polir progressivement la surface de l'échantillon afin d'obtenir la finition idéale.

L'échantillon est ensuite gravé. Le but de la gravure est d'utiliser des réactifs chimiques pour traiter la surface de l'échantillon, améliorer la visibilité des pores et des joints de grains, et faciliter leur identification. Les solutions de gravure couramment utilisées sont l'ammoniaque, le chlorure ferrique, etc. Le choix des réactifs chimiques spécifiques dépend du matériau de l'échantillon et des caractéristiques microstructurales à observer.

Une fois l'échantillon préparé, il est placé sous un microscope métallographique pour observation. Ce microscope fournit des images haute résolution permettant un grossissement de la surface de la feuille de cuivre-molybdène de plusieurs centaines de fois, voire plus, et révélant avec précision la morphologie et la répartition des pores. En ajustant le grossissement du microscope, la microstructure est observée à différents niveaux, avec une attention particulière portée à l'identification des zones défectueuses telles que les pores et les fissures. Les pores apparaissent généralement sous forme de zones noires ou transparentes, présentant des propriétés physiques différentes de celles de la matrice métallique.

Pour calculer la porosité, il faut d'abord prendre des images au microscope. Ces images seront ensuite analysées et traitées automatiquement par un logiciel d'analyse d'images. Ce logiciel identifie automatiquement les zones de pores dans l'image grâce à différents algorithmes et calcule leur rapport de surface. Généralement, le logiciel utilise différentes couleurs pour distinguer la zone des pores de la zone métallique et calculer leur rapport de surface. La porosité est calculée selon la formule suivante :

$$\text{孔隙率} = \frac{\text{孔隙区域的面积}}{\text{总面积}} \times 100\%$$

Selon cette formule, la porosité de l'échantillon peut être déterminée. Afin de garantir l'exactitude des résultats des tests, il est généralement nécessaire d'effectuer plusieurs mesures sur différentes zones et de calculer la valeur moyenne. L'avantage du microscope métallographique est qu'il fournit des images haute résolution, permettant d'afficher clairement les pores et les défauts les plus infimes, ce qui permet d'évaluer plus précisément la porosité des feuilles de cuivre-molybdène. L'introduction d'un logiciel

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

d'analyse d'images améliore l'efficacité et la précision du processus de test de porosité, et réduit les erreurs humaines.

6.3 Essai de traction d'une feuille de cuivre et de molybdène

L'essai de traction est une méthode importante pour évaluer les propriétés mécaniques des feuilles de cuivre-molybdène. Il est principalement utilisé pour mesurer les caractéristiques contrainte-déformation des matériaux sous tension, ce qui peut refléter leur résistance, leur ductilité et leur ténacité. Les essais de traction sont généralement réalisés à l'aide d'une machine d'essai de matériaux universelle, qui permet de contrôler avec précision l'application des charges et d'enregistrer la déformation des feuilles de cuivre-molybdène pendant l'étirement.

6.3.1 Utilisation d'une machine d'essai de matériaux universelle

La machine d'essai universelle des matériaux est un équipement d'essai mécanique couramment utilisé pour tester les propriétés mécaniques des matériaux, telles que la traction, la compression et la flexion. Lors de l'essai de traction, l'échantillon de feuille de cuivre-molybdène est placé entre les deux pinces de la machine. Celle-ci déforme l'échantillon pendant l'application de la force en appliquant une force de traction progressivement croissante jusqu'à la rupture du matériau ou à sa capacité de charge maximale. Pendant l'essai, les deux extrémités de la feuille de cuivre-molybdène sont d'abord serrées dans la pince de la machine afin de garantir une position de serrage stable et d'éviter les erreurs d'essai dues à un serrage instable. Ensuite, la machine applique une force de traction à vitesse constante tout en surveillant l'allongement de l'échantillon. Pendant l'étirement, la machine enregistre automatiquement les données de charge et de déformation et obtient des paramètres importants tels que la résistance à la traction, la limite d'élasticité et l'allongement du matériau grâce à l'analyse des données. La machine d'essai universelle des matériaux offre une base fiable pour l'évaluation des performances des tôles de cuivre-molybdène grâce au contrôle de la vitesse d'étirage et à l'enregistrement précis des données mécaniques. Largement utilisée pour le contrôle qualité et la recherche et développement de tôles de cuivre-molybdène, elle contribue à optimiser les performances des matériaux.

6.4 Essai de pliage d'une feuille de cuivre et de molybdène

L'essai de flexion permet de déterminer la capacité de déformation des matériaux soumis à une charge de flexion et d'évaluer leur résistance et leur ténacité. Cet essai utilise généralement les méthodes de flexion trois points et quatre points, largement utilisées pour tester les performances des tôles de cuivre-molybdène et d'autres matériaux métalliques.

6.4.1 Méthode de flexion en trois points

La méthode de flexion trois points est l'une des méthodes d'essai de flexion les plus courantes. Elle applique une charge concentrée perpendiculairement à la surface de la feuille de cuivre-molybdène au centre afin d'induire une déformation par flexion lorsqu'elle est soutenue aux deux extrémités. Lors de l'essai, la feuille de cuivre-molybdène est placée entre deux points d'appui et une charge uniforme est

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

appliquée au centre. À mesure que la charge augmente, la feuille de cuivre-molybdène se plie jusqu'à la limite d'élasticité ou de rupture du matériau.

Cette méthode permet de mesurer intuitivement la résistance et la rigidité à la flexion des tôles de cuivre-molybdène. L'observation de la fracture ou de la déformation plastique de l'échantillon pendant le pliage permet d'évaluer la résistance à la flexion du matériau. Lors de la production de tôles de cuivre-molybdène, la méthode de pliage trois points est particulièrement adaptée pour tester la performance du matériau sous des charges concentrées en utilisation réelle. Cette méthode présente les avantages suivants : simplicité du processus d'essai, adaptation à des échantillons de différentes tailles et épaisseurs, facilité d'utilisation et rapidité d'obtention de données fiables sur la performance de pliage.

6.4.2 Méthode de flexion en quatre points

La méthode de flexion en quatre points est une autre méthode d'essai de flexion couramment utilisée. Sa différence avec la méthode en trois points réside dans le mode d'application de la charge. La méthode en quatre points permet d'obtenir une contrainte de flexion uniforme sur la feuille de cuivre-molybdène en appliquant une charge uniforme entre deux points de l'échantillon et une pression supplémentaire en deux points entre les points d'appui. Comparée à la méthode en trois points, la méthode en quatre points permet une répartition plus uniforme des contraintes sur l'échantillon, évite l'effet des contraintes concentrées et reflète plus précisément la résistance à la flexion du matériau. Lors de l'essai, l'échantillon de tôle de cuivre-molybdène est placé entre deux points d'appui et la charge appliquée est appliquée sur sa zone centrale par une pression en deux points. À mesure que la charge augmente, la déformation en flexion de la tôle de cuivre-molybdène augmente progressivement jusqu'à atteindre la limite d'élasticité ou la rupture du matériau. La méthode de flexion en quatre points permet d'éviter efficacement les contraintes locales excessives, typiques de la méthode de flexion en trois points, et convient parfaitement aux essais de flexion de plaques minces ou d'échantillons de grandes dimensions. L'avantage de la méthode de flexion en quatre points est qu'elle peut simuler plus précisément le comportement des matériaux sous une charge uniforme et qu'elle convient aux scénarios de test avec des exigences élevées en matière de performances de flexion des feuilles de cuivre-molybdène hautes performances.

6.5 Essai de ténacité aux chocs d'une tôle de cuivre et de molybdène

L'essai de ténacité aux chocs évalue la capacité des tôles de cuivre-molybdène à résister à la propagation des fissures et aux dommages sous l'action d'une force externe soudaine. Il est généralement réalisé par un essai de choc pendulaire. La ténacité aux chocs reflète la fragilité ou la ténacité du matériau dans des conditions extrêmes, ce qui est particulièrement important pour la performance des tôles de cuivre-molybdène sous des impacts ou des contraintes importants.

6.5.1 Points clés pour le fonctionnement de l'essai d'impact du pendule

L'essai d'impact au pendule est l'une des méthodes les plus courantes pour tester la ténacité des matériaux. Lors de cet essai, l'échantillon est placé sur un support fixe et impacté par un pendule. Ce dernier oscille à un angle et une vitesse donnés, heurtant l'échantillon et provoquant sa rupture ou sa déformation

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

plastique. La machine d'essai enregistre l'énergie absorbée par l'échantillon après l'impact, reflétant ainsi sa ténacité.

Lors de l'essai, un échantillon de tôle de cuivre-molybdène de taille standard est d'abord découpé en petits échantillons pour essai, et la surface est vérifiée sans défaut. L'échantillon est ensuite fixé sur la table de support de la machine d'essai, le point d'appui étant positionné de manière à assurer une contrainte uniforme aux deux extrémités. Une fois le pendule en position initiale, il est relâché et percute l'échantillon, le brisant. Pendant l'essai, l'énergie cinétique du pendule est transférée à l'échantillon par l'impact. La variation de hauteur du pendule avant et après l'impact est enregistrée afin de calculer l'énergie d'impact absorbée par l'échantillon.

L'essai d'impact au pendule permet de tester efficacement les performances des tôles de cuivre-molybdène dans des conditions mécaniques extrêmes, notamment en cas de variations importantes de température ou de charges rapides. La résistance aux chocs du matériau est un indicateur important pour évaluer sa fiabilité.

6.6 Essai de conductivité thermique d'une feuille de cuivre et de molybdène

La conductivité thermique est un paramètre important pour mesurer la capacité de conduction thermique des feuilles de cuivre-molybdène, ce qui affecte directement leurs performances dans des environnements à haute température. Un test de conductivité thermique permet d'évaluer la capacité de conduction et de gestion thermique des feuilles de cuivre-molybdène, ce qui est particulièrement important pour les applications en électronique, en aérospatiale et dans d'autres domaines.

6.6.1 Principe et application de la méthode du flash laser

La méthode du flash laser est une méthode sans contact couramment utilisée pour mesurer la conductivité thermique des matériaux. Son principe consiste à irradier un faisceau laser sur la surface du matériau, à chauffer rapidement une petite zone, puis à calculer la conductivité thermique du matériau en mesurant la variation de température de surface. Lors du test du flash laser, l'impulsion laser irradie la surface de la feuille de cuivre-molybdène, la chauffant instantanément. Une fois l'énergie laser absorbée, la température augmente rapidement et diminue par conduction interne. À l'aide d'une caméra thermique ou d'un capteur infrarouge de haute précision, l'évolution de la température de surface du matériau au fil du temps est testée. La courbe temporelle de variation de température permet de calculer la diffusivité et la conductivité thermiques du matériau.

L'avantage de la méthode flash laser réside dans sa capacité à mesurer rapidement et précisément la conductivité thermique des matériaux, sans contact et sans destruction. Grâce à sa rapidité de mesure et à sa grande précision, elle est souvent utilisée pour évaluer les propriétés thermiques des tôles de cuivre-molybdène et d'autres matériaux hautes performances, notamment pour les tests de conductivité thermique des tôles minces. Cette méthode est largement utilisée dans les matériaux haute température, les composants électroniques, les matériaux aérospatiaux, etc., et est essentielle pour optimiser les performances de gestion thermique des feuilles de cuivre-molybdène. Lors de la conception et de

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

l'application de ces feuilles, la compréhension de leur conductivité thermique est essentielle pour garantir leur stabilité et leur efficacité dans des environnements thermiques complexes.

6.7 Test du coefficient de dilatation thermique d'une feuille de cuivre et de molybdène

Le coefficient de dilatation thermique est le rapport entre la variation dimensionnelle d'un matériau et les variations de température. Les caractéristiques de dilatation thermique des feuilles de cuivre-molybdène dans des environnements à haute température sont particulièrement importantes pour leurs applications, notamment dans les domaines de l'électronique et de l'électricité qui nécessitent une stabilité à haute température. Le test du coefficient de dilatation thermique est généralement réalisé à l'aide d'un analyseur thermomécanique (TMA).

6.7.1 Utilisation de l'analyseur thermomécanique (TMA)

L'analyseur thermomécanique (TMA) est un instrument d'analyse thermique utilisé pour mesurer les variations dimensionnelles des matériaux sous contrôle de température, en fonction de la température, du temps et de la force appliquée. Son principe de base est de caractériser les propriétés thermomécaniques des matériaux en appliquant une charge mécanique constante ou dynamique à l'échantillon, tout en contrôlant les variations de température et en surveillant la dilatation, la contraction, le ramollissement et toute autre déformation de l'échantillon. Le TMA est largement utilisé en science des matériaux, en ingénierie et en fabrication pour étudier la dilatation thermique, le point de ramollissement et les caractéristiques de changement de phase des métaux, des céramiques, des polymères et des matériaux composites (tels que les feuilles de cuivre et de molybdène). Par exemple, lors des essais sur des feuilles de cuivre et de molybdène, le TMA peut être utilisé pour évaluer la compatibilité de son coefficient de dilatation thermique (CTE) avec des matériaux céramiques ou semi-conducteurs afin de garantir la fiabilité des boîtiers électroniques ou des applications aérospatiales. Le TMA est généralement équipé d'une sonde, d'un système de serrage de l'échantillon, d'un four de chauffage et d'un capteur de déplacement (tel qu'un transformateur différentiel variable linéaire, LVDT), qui peut enregistrer avec précision les variations dimensionnelles des échantillons en compression, traction ou flexion. Certains instruments TMA avancés prennent également en charge la calorimétrie différentielle à balayage simultané (SDTA), qui peut mesurer simultanément les effets thermiques (tels que la fusion ou la cristallisation) pour fournir des informations plus complètes sur le comportement des matériaux.

Procédure TMA

L'utilisation de la TMA implique une série d'étapes standardisées pour garantir des résultats d'essai précis et reproductibles. Tout d'abord, préparez l'échantillon. Assurez-vous qu'il présente une forme régulière (par exemple, une plaque mince ou un échantillon cylindrique de feuille de cuivre-molybdène) pour s'adapter au système de serrage. La taille de l'échantillon est généralement déterminée par le type de fixation ; par exemple, la hauteur et le diamètre de l'échantillon en mode compression doivent s'adapter à la fixation. Ensuite, choisissez le type de sonde approprié (par exemple, sonde de compression, fixation de traction ou fixation de flexion trois points) et configurez-la en fonction des objectifs de l'essai (tels

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

que la dilatation thermique ou le point de ramollissement). Par exemple, pour tester le coefficient de dilatation thermique d'une feuille de cuivre-molybdène, une sonde de compression est généralement utilisée pour mesurer la dilatation linéaire. L'étalonnage de l'instrument est une étape clé. Le capteur de température et le capteur de déplacement doivent être étalonnés pour garantir la précision de la mesure. Après l'étalonnage, l'échantillon est placé dans le four à proximité du capteur de température pour assurer un contrôle précis de la température. Définissez les conditions d'essai, notamment le programme de température (chauffage, refroidissement ou isotherme), la force appliquée (constante ou dynamique) et l'atmosphère (gaz inerte ou air, par exemple). Pendant l'essai, la sonde enregistre les variations dimensionnelles de l'échantillon grâce au capteur de déplacement, et les données sont collectées et analysées en temps réel par le logiciel de l'instrument. Une fois l'essai terminé, le dispositif est nettoyé et l'état de l'échantillon est vérifié afin d'éviter toute contamination ou tout dommage à l'équipement. L'ensemble du processus doit respecter scrupuleusement les procédures opérationnelles, notamment la norme ASTM E831, afin de garantir la conformité des résultats aux spécifications de l'industrie.

Application du TMA aux tests de tôles de cuivre et de molybdène

Le TMA est largement utilisé pour tester les feuilles de cuivre-molybdène, notamment pour évaluer leurs propriétés thermomécaniques afin de répondre aux besoins de l'électronique, de l'aérospatiale et de l'optoélectronique. Les feuilles de cuivre-molybdène (telles que Mo85Cu15, Mo70Cu30) sont souvent utilisées dans les substrats de dissipation thermique et les composants de gestion thermique en raison de leur conductivité thermique élevée et de leur faible dilatation thermique. Le molybdène est testé en mode compression pour vérifier leur compatibilité thermique avec les matériaux céramiques (tels que le nitrure d'aluminium) et prévenir les défaillances dues aux contraintes thermiques dans les boîtiers électroniques. Par exemple, dans les équipements de communication 5G, les tests TMA garantissent que le coefficient de dilatation thermique du Mo60Cu40 est cohérent avec le matériau du substrat afin d'optimiser la stabilité de la transmission du signal. De plus, la TMA permet de détecter le point de ramollissement des feuilles de cuivre au molybdène et d'évaluer leur stabilité dans des environnements à haute température (tels que les réacteurs aérospatiaux). Les essais en mode traction permettent de caractériser le comportement mécanique des feuilles de cuivre au molybdène, notamment leur résistance à la traction et leur ductilité, et conviennent à la vérification de la conception des feuilles de cuivre au molybdène destinées à l'aérospatiale. La TMA permet également d'analyser la résistance à la flexion des feuilles de cuivre au molybdène grâce à des essais de flexion trois points afin de garantir leur fiabilité dans des environnements de contraintes complexes. La fonction SDTA synchrone améliore encore les capacités de test. Par exemple, lors du test du Mo50Cu50, la dilatation thermique et les changements de phase potentiels ou les réactions chimiques peuvent être détectés simultanément pour fournir des informations complètes sur les propriétés du matériau.

Précautions d'emploi du TMA

Lors de l'utilisation de la TMA, plusieurs aspects doivent être pris en compte pour garantir la fiabilité des résultats d'essai et la sécurité de l'instrument. Premièrement, la forme et la taille de l'échantillon doivent être rigoureusement contrôlées afin d'éviter que des échantillons irréguliers ne provoquent un mauvais contact avec le dispositif ou des erreurs de mesure. Le choix de l'atmosphère ambiante est

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

également crucial. Par exemple, lors des essais sur des feuilles de cuivre-molybdène, des gaz inertes (tels que l'azote ou l'argon) doivent être utilisés pour prévenir l'oxydation de la phase cuivre à haute température. Le réglage du programme de température doit être adapté aux propriétés du matériau. Par exemple, la plage de températures d'essai des feuilles de cuivre-molybdène couvre généralement l'environnement d'application réel (par exemple, de -50 °C à 800 °C) afin d'éviter de dépasser la limite de tolérance du matériau. Le contrôle de la force appliquée doit être précis. Une force excessive peut déformer ou endommager l'échantillon, tandis qu'une force trop faible peut ne pas détecter précisément les variations dimensionnelles. De plus, l'étalonnage régulier des instruments (tels que les capteurs de température et de déplacement) est indispensable pour garantir l'exactitude des données. Il est recommandé de se référer aux normes ASTM E2113 et E1363 pour l'étalonnage. Les opérateurs doivent connaître le logiciel de l'instrument et les méthodes d'analyse des données pour interpréter correctement les résultats des tests, notamment pour distinguer les variations dimensionnelles dues à la dilatation thermique et au ramollissement. Enfin, les résidus d'échantillon doivent être soigneusement nettoyés après l'essai afin d'éviter toute contamination du support ou du corps du four et de garantir un fonctionnement stable et durable de l'instrument.

6.8 Essai de résistivité d'une feuille de cuivre et de molybdène

La résistivité est un paramètre clé pour mesurer la conductivité des matériaux. Pour les matériaux métalliques tels que les feuilles de cuivre-molybdène, leur résistivité influence directement leurs applications dans les équipements haute fréquence et la transmission d'énergie. Le test de résistivité est souvent réalisé selon la méthode des quatre sondes.

6.8.1 Processus de mesure à quatre sondes

La méthode des quatre sondes permet de calculer avec précision la résistivité d'un matériau en appliquant un courant à sa surface et en mesurant la chute de tension. Lors de l'essai, quatre sondes sont disposées uniformément sur la surface de l'échantillon : les deux sondes extérieures servent à appliquer un courant constant et les deux sondes intérieures à mesurer la chute de tension. Ainsi, la relation entre le courant et la chute de tension permet de calculer la résistance du matériau. La surface de l'échantillon doit être plane et propre, et toute saleté ou couche d'oxyde peut altérer les résultats de mesure. Lors de l'essai, les quatre sondes transmettent un courant et mesurent la tension en contactant la surface de l'échantillon. L'appareil enregistre les variations de tension et de courant pour calculer la résistivité. Cette méthode permet d'éliminer l'influence de la résistance de contact et de garantir la précision des mesures. Elle est adaptée aux tests de résistivité de matériaux hautement conducteurs tels que les feuilles de cuivre-molybdène. La méthode à quatre sondes est particulièrement adaptée à la mesure de la résistivité des matériaux en couches minces. Elle fournit des données de résistivité de haute précision, essentielles à l'application des feuilles de cuivre-molybdène dans l'électronique, les semi-conducteurs et d'autres domaines.

6.9 Essai de résistance de contact d'une feuille de cuivre-molybdène

La résistance de contact désigne la résistance générée par la surface de contact de deux matériaux en raison de la rugosité, de l'oxydation ou d'autres facteurs. Dans l'application des feuilles de cuivre-

molybdène, la résistance de contact affecte l'efficacité de la conduction du courant, en particulier dans les composants électroniques haute fréquence. Sa valeur affecte directement les performances et la stabilité de l'équipement.

6.9.1 Spécifications de fonctionnement de la méthode de chute de tension continue

La méthode de chute de tension continue est une méthode de test de résistance de contact couramment utilisée. La résistance de contact est calculée en appliquant un courant continu et en mesurant la chute de tension à la surface de contact. Lors de l'essai, l'échantillon de feuille de cuivre-molybdène est d'abord placé en contact étroit avec une autre électrode. On s'assure que la surface du point de contact est exempte de saleté et d'oxydes, et que le traitement de surface atteint la planéité requise.

Lors du test, un courant est appliqué à la surface de contact via une alimentation externe et la chute de tension au point de contact est mesurée. La résistance de contact peut être obtenue à partir de la relation entre le courant et la tension. Cette méthode permet de mesurer efficacement les caractéristiques de résistance des feuilles de cuivre-molybdène au contact d'autres métaux et est particulièrement adaptée au contrôle qualité des connecteurs électriques haute fréquence. La méthode de chute de tension continue présente les avantages suivants : simplicité d'utilisation, fiabilité des données et absence d'équipement spécifique. Elle est particulièrement adaptée au contrôle qualité quotidien et à la détection de la résistance de contact en production. Pour les feuilles de cuivre-molybdène, le maintien d'une faible résistance de contact est essentiel à leur bonne performance dans les applications électriques. Des tests réguliers de résistance de contact sont donc essentiels pour garantir la qualité et la stabilité du matériau.



Image de la feuille de cuivre et de molybdène CTIA GROUP LTD

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

CTIA GROUP LTD

Molybdenum Copper Sheets Introduction

1. Overview of Molybdenum Copper Sheets

Molybdenum-copper (Mo-Cu) sheets are composite materials composed of molybdenum and copper. Thanks to their unique combination of thermal, electrical, and mechanical properties, as well as their tunability, Mo-Cu sheets are widely used in fields such as thermal management, high-performance electronic devices, semiconductors, and aerospace. They are commonly utilized as packaging materials, integrated circuit substrates, heat sinks, and LED thermal dissipation substrates. At CTIA GROUP LTD, we can customize molybdenum-copper products with specific dimensions and compositions according to customer requirements.

2. Features of Molybdenum Copper Sheets

Excellent Electrical Conductivity: Suitable for applications requiring efficient electrical connections.

High Thermal Conductivity: Capable of rapid heat transfer, ideal for electronic devices that require effective thermal dissipation.

Low Coefficient of Thermal Expansion: Highly compatible with semiconductor materials like silicon, helping to minimize thermal stress caused by temperature fluctuations and preventing deformation or damage to components.

Good Workability: Can be processed through cutting and other techniques into parts of various sizes and shapes to meet diverse application needs.

3. Typical Properties of Molybdenum-Copper Alloys

Material Composition	Density (g/cm ³)	Thermal Conductivity (W/M·K at 25°C)	Thermal Expansion Coefficient (10 ⁻⁶ /°C)
Mo85Cu15	10.00	160-180	6.8
Mo80Cu20	9.90	170-190	7.7
Mo70Cu30	9.80	180-200	9.1
Mo60Cu40	9.66	210-250	10.3
Mo50Cu50	9.54	230-270	11.5

4. Production Method of Molybdenum Copper Sheets

The preparation of molybdenum-copper sheets is primarily carried out using the infiltration method, which takes advantage of molybdenum's high melting point and copper's excellent fluidity. In this process, copper is infiltrated into a molybdenum preform at high temperatures, resulting in the formation of a dense molybdenum-copper composite material.

5. Purchasing Information

Email: sales@chinatungsten.com; Phone: +86 592 5129595; 592 5129696

Website: molybdenum-copper.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 Domaines d'application des feuilles de cuivre et de molybdène

La feuille de cuivre molybdène est largement utilisée dans de nombreux domaines de haute technologie grâce à ses avantages uniques en termes de conductivité thermique, de conductivité électrique et de résistance aux hautes températures. Dans l'industrie électronique en particulier, elle est devenue un matériau indispensable pour de nombreux appareils haute puissance et haute fréquence grâce à ses excellentes performances. Les trois principales applications de la feuille de cuivre molybdène dans l'industrie électronique sont les matériaux d'emballage, les substrats de circuits intégrés et les composants de dissipation thermique des dispositifs micro-ondes.

7.1.1 Matériaux d'emballage

Dans la technologie de l'encapsulation électronique, l'utilisation de feuilles de cuivre et de molybdène est cruciale. Les composants électroniques, en particulier les semi-conducteurs de haute puissance et les dispositifs microélectroniques, génèrent beaucoup de chaleur en fonctionnement. Une dissipation thermique insuffisante peut entraîner une surchauffe, des dommages ou une défaillance des composants électroniques. Par conséquent, des solutions de dissipation thermique efficaces sont essentielles pour l'encapsulation électronique. La feuille de cuivre et de molybdène est devenue un choix idéal pour les matériaux d'encapsulation électronique grâce à ses propriétés physiques uniques.

Molybdène se distingue par sa conductivité thermique élevée et sa stabilité à haute température. Grâce à son point de fusion élevé (environ 3 262 °C), le molybdène maintient la stabilité structurelle dans les environnements à haute température et évite la déformation ou la défaillance des matériaux. Le cuivre est un bon conducteur électrique et thermique, capable de conduire efficacement la chaleur générée par les composants électroniques du boîtier vers l'extérieur. Grâce à ces deux matériaux, la feuille de cuivre et de molybdène présente d'excellentes performances de dissipation thermique et une bonne résistance mécanique, ce qui en fait le matériau de choix pour une dissipation thermique efficace dans les boîtiers électroniques.

Dans le conditionnement des semi-conducteurs, les feuilles de cuivre-molybdène assurent non seulement une dissipation thermique efficace, mais résistent également aux variations de température lors d'un fonctionnement prolongé à haute puissance. Pour les dispositifs haute fréquence et haute puissance, la stabilité des feuilles de cuivre-molybdène est particulièrement importante. Elles supportent d'importantes variations de température sans fatigue thermique, garantissant ainsi la fiabilité à long terme des équipements électroniques. De plus, leur coefficient de dilatation thermique est relativement uniforme, ce qui est essentiel pour éviter les contraintes dues aux différences de dilatation thermique dans le boîtier et peut prévenir efficacement les défaillances du boîtier dues aux contraintes thermiques.

Le molybdène présente également une forte résistance à la corrosion. De nombreux circuits haute fréquence et appareils électroniques de puissance doivent fonctionner dans des environnements difficiles, tels que des températures, une humidité et une tension élevées, ce qui impose des exigences strictes en matière de performances des matériaux d'emballage. La feuille de cuivre au molybdène permet de

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

maintenir des performances stables dans ces conditions extrêmes et de prolonger la durée de vie des équipements électroniques.

Dans le conditionnement des circuits intégrés, les feuilles de cuivre-molybdène sont de plus en plus utilisées comme substrats. Elles résistent à la charge thermique des signaux haute puissance tout en évitant la dégradation des performances des circuits intégrés due à la surchauffe. Avec l'amélioration continue de l'intégration des dispositifs électroniques, les exigences en matière de dissipation thermique sont de plus en plus élevées. L'émergence des feuilles de cuivre-molybdène résout efficacement ce problème et devient un matériau essentiel pour les conditionnements haute densité de puissance.

7.1.2 Substrats de circuits intégrés

Molybdène dans les substrats de circuits intégrés (CI) est également très importante. Les circuits intégrés sont largement utilisés dans les ordinateurs, les équipements de communication, l'électronique grand public et d'autres domaines. Ces dispositifs fonctionnent généralement à haute puissance et haute fréquence, ce qui rend la dissipation thermique des circuits intégrés particulièrement critique. En tant que matériau de substrat pour CI, la feuille de cuivre-molybdène peut répondre aux exigences de dissipation thermique des circuits haute puissance et haute fréquence et maintenir un faible coefficient de dilatation thermique, améliorant ainsi la fiabilité et la stabilité à long terme des CI. La fonction principale du substrat de circuit intégré est de supporter la puce et d'assurer les connexions électriques nécessaires. La complexité croissante des fonctions des circuits intégrés et leur intégration de plus en plus poussée entraînent une augmentation de leur charge thermique. Les matériaux de substrat traditionnels pour CI ne dissipent souvent pas efficacement la chaleur, ce qui entraîne une dégradation des performances, voire une défaillance, des circuits intégrés lorsqu'ils fonctionnent à haute température. La feuille de cuivre-molybdène présente une conductivité thermique extrêmement élevée et peut efficacement conduire la chaleur générée par la puce, empêchant ainsi la surchauffe et les dommages.

La feuille de cuivre-molybdène présente de nombreux avantages comme substrat pour circuits intégrés. Premièrement, sa conductivité thermique extrêmement élevée permet un transfert rapide de la chaleur de la puce vers l'environnement extérieur, évitant ainsi les dommages dus à la surchauffe. Deuxièmement, son coefficient de dilatation thermique est relativement proche de celui des matériaux pour circuits intégrés (comme les puces de silicium), ce qui réduit les contraintes thermiques dues aux variations de température, améliorant ainsi la fiabilité et la durée de vie du circuit intégré. Enfin, la feuille de cuivre-molybdène présente une excellente résistance à l'oxydation et à la corrosion, et maintient de bonnes performances dans des environnements difficiles, prolongeant ainsi la durée de vie des équipements électroniques.

Les exigences en matériaux pour les substrats de circuits intégrés augmentent progressivement. Pour les dispositifs haute fréquence et haute puissance, les feuilles de cuivre-molybdène sont devenues un choix idéal. En particulier dans les domaines exigeant une dissipation thermique efficace, une transmission de signaux haute fréquence et une puissance de sortie élevée, les feuilles de cuivre-molybdène gagnent en importance. Dans les domaines de haute technologie tels que les systèmes radar, les communications par satellite et les communications par fibre optique, les feuilles de cuivre-molybdène, utilisées comme

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

substrats de circuits intégrés, peuvent améliorer efficacement l'efficacité et la stabilité opérationnelles des systèmes et garantir le fonctionnement à long terme des équipements électroniques dans des environnements complexes.

7.1.3 Composants de dissipation thermique dans les dispositifs à micro-ondes

Les dispositifs micro-ondes sont des composants importants des équipements de communication, de radar et de télédétection utilisés dans la bande de fréquences micro-ondes (généralement comprise entre 300 MHz et 300 GHz). Ils sont largement utilisés dans les communications par satellite, les radiocommunications, le diagnostic médical et les radars militaires. Ces dispositifs doivent généralement résister à des signaux de forte puissance et à des environnements de travail haute fréquence, ce qui impose des exigences très strictes en matière de système de dissipation thermique. Les feuilles de cuivre-molybdène sont devenues des composants importants de dissipation thermique dans les dispositifs micro-ondes en raison de leur excellente conductivité thermique et de leur résistance aux températures élevées.

Dans les dispositifs à micro-ondes, la dissipation thermique des feuilles de cuivre-molybdène est particulièrement critique. Les dispositifs à micro-ondes fonctionnent généralement à hautes fréquences et génèrent beaucoup de chaleur lors de la transmission du signal. Si la chaleur n'est pas dissipée rapidement et efficacement, l'appareil dysfonctionnera ou ses performances se dégraderont en raison d'une surchauffe. En tant que composant de dissipation thermique, la feuille de cuivre-molybdène peut rapidement absorber la chaleur générée par l'appareil et la conduire vers l'environnement extérieur grâce à sa conductivité thermique élevée, réduisant ainsi efficacement la température de fonctionnement de l'appareil et garantissant sa stabilité et sa fiabilité.

La feuille de cuivre molybdène utilisée dans les dispositifs à micro-ondes ne se limite pas à la dissipation thermique, mais sert également de support structurel. Sa résistance et sa rigidité élevées lui permettent de jouer un rôle de support dans la structure des dispositifs à micro-ondes et de résister aux températures élevées et aux contraintes mécaniques internes. Parallèlement, son coefficient de dilatation thermique est comparable à celui des autres matériaux utilisés dans les dispositifs à micro-ondes, évitant ainsi l'accumulation de contraintes due aux différences de dilatation thermique et améliorant ainsi la stabilité du dispositif. Dans les systèmes radar, la dissipation thermique des feuilles de cuivre-molybdène est également cruciale. Ces systèmes doivent fonctionner à haute puissance pendant de longues périodes, et les ondes radar génèrent beaucoup de chaleur lors de l'émission et de la réception. En tant que composant de dissipation thermique, les feuilles de cuivre-molybdène garantissent un fonctionnement stable et durable des équipements radar dans des conditions de température élevée. Dans les systèmes de communication par satellite, l'excellente dissipation thermique des feuilles de cuivre-molybdène garantit un fonctionnement fiable des équipements satellites dans des environnements extrêmes et prolonge leur durée de vie.

7.1.4 Composants de support structurel dans les dispositifs à micro-ondes

Les dispositifs micro-ondes fonctionnent généralement dans des environnements à haute fréquence et à forte puissance. Ils doivent donc présenter une bonne dissipation thermique, une stabilité structurelle et

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

une bonne résistance à la dilatation thermique. Les feuilles de cuivre-molybdène jouent un rôle important en tant que composants de support structurel dans les dispositifs micro-ondes. Les dispositifs micro-ondes, tels que les amplificateurs micro-ondes, les radars, les modules de communication, etc., génèrent beaucoup de chaleur en fonctionnement. Si cette chaleur n'est pas dissipée à temps, elle surchauffe, affectant ainsi leur stabilité et leur durée de vie. La conductivité thermique élevée des feuilles de cuivre-molybdène leur permet d'absorber et de conduire efficacement la chaleur dans les dispositifs micro-ondes, évitant ainsi d'endommager les circuits ou les composants en cas de températures excessives. De plus, leur résistance aux températures élevées leur permet de fonctionner de manière stable dans des environnements à forte puissance et de supporter la chaleur et les contraintes mécaniques générées par le fonctionnement des dispositifs micro-ondes. Dans les dispositifs micro-ondes, les feuilles de cuivre-molybdène jouent non seulement un rôle dans la dissipation thermique, mais assurent également le support et la fixation des dispositifs. La rigidité et la résistance élevées du cuivre-molybdène lui permettent de soutenir les composants internes du dispositif micro-ondes et de maintenir la stabilité structurelle. Le coefficient de dilatation thermique des feuilles de cuivre-molybdène étant relativement proche de celui d'autres matériaux micro-ondes courants (tels que la céramique, le silicium, etc.), elles permettent d'éviter efficacement les contraintes matérielles dues aux différences de dilatation thermique, améliorant ainsi la fiabilité de fonctionnement des dispositifs micro-ondes.

De plus, les propriétés antioxydantes de la feuille de cuivre-molybdène lui confèrent un avantage pour une utilisation à long terme des appareils à micro-ondes. Ces appareils sont souvent exposés à des environnements de travail difficiles, tels que des températures et une humidité élevées, ainsi qu'aux rayonnements électromagnétiques. La feuille de cuivre-molybdène permet de maintenir des performances stables dans ces conditions extrêmes et de prolonger la durée de vie des appareils à micro-ondes.

7.1.5 Matériaux du dissipateur thermique

Les dissipateurs thermiques sont des composants essentiels pour la dissipation thermique des appareils électroniques, notamment dans les domaines des dispositifs électroniques de forte puissance, des lasers et des équipements radiofréquence. La conception et le choix des matériaux des dissipateurs thermiques sont essentiels à la stabilité à long terme des équipements. Les feuilles de cuivre-molybdène, comme matériaux de dissipation thermique, sont largement utilisées dans le domaine de la dissipation thermique en raison de leurs excellentes propriétés de conductivité thermique et de dilatation thermique.

Dans les appareils électroniques, notamment ceux de forte puissance tels que les semi-conducteurs de puissance et les diodes laser, les feuilles de cuivre-molybdène peuvent efficacement conduire la chaleur générée par les composants de l'intérieur vers le système de refroidissement externe, évitant ainsi les pannes ou les dégradations de performances dues à la surchauffe. Leur conductivité thermique élevée leur confère un avantage considérable dans les applications miniaturisées à forte densité de puissance. Elles permettent une dissipation rapide de la chaleur et garantissent un fonctionnement stable du dispositif à haute température. De plus, le coefficient de dilatation thermique de la feuille de cuivre-molybdène est relativement uniforme, comparable à celui de nombreux matériaux pour appareils électroniques, ce qui réduit les contraintes dues aux différences de dilatation thermique. En particulier

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

dans les applications nécessitant des chauffages et refroidissements fréquents, la feuille de cuivre-molybdène, utilisée comme dissipateur thermique, résiste efficacement à ces variations de température et évite toute déformation ou détérioration du matériau due aux contraintes thermiques. molybdène est également un matériau de dissipation thermique idéal, notamment dans les environnements extrêmes, tels qu'une forte humidité ou des environnements gazeux corrosifs. Elle peut fonctionner de manière stable et durable, sans être affectée par l'environnement extérieur. Elle joue un rôle essentiel comme matériau de dissipation thermique dans les applications haut de gamme telles que les lasers, les modules RF, les lasers à semi-conducteurs et les équipements de communication par satellite.

7.1.6 Module RF

Les modules radiofréquence (RF) sont largement utilisés dans les communications sans fil, les radars, les communications par satellite et d'autres domaines. Ils fonctionnent dans des environnements haute fréquence et haute puissance, ce qui impose des exigences très strictes en matière de matériaux. Ces matériaux doivent non seulement présenter une excellente conductivité électrique, mais aussi une excellente gestion thermique. Les feuilles de cuivre-molybdène, matériau de base des modules RF, sont largement utilisées dans ce domaine en raison de leurs propriétés uniques.

La chaleur générée par le module RF en fonctionnement doit être dissipée rapidement et efficacement, sous peine d'affecter la stabilité de l'appareil et la qualité du signal. La conductivité thermique élevée de la feuille de cuivre-molybdène lui permet de conduire rapidement la chaleur générée par le module RF vers le système de dissipation thermique externe, maintenant ainsi la température de l'appareil dans une plage de sécurité et prévenant toute dégradation des performances ou panne due à une surchauffe. Comparée aux matériaux traditionnels en cuivre ou en aluminium, la conductivité thermique de la feuille de cuivre-molybdène est nettement améliorée et permet de transporter une densité de puissance plus élevée dans un volume réduit, s'adaptant ainsi aux besoins des modules RF haute puissance. La connexion électrique et la conduction du signal dans le module RF exigent une conductivité élevée du matériau. La feuille de cuivre-molybdène allie la stabilité à haute température du molybdène à l'excellente conductivité du cuivre, permettant ainsi une connexion électrique efficace dans le module RF, assurant une transmission stable et un contrôle précis du signal. Étant donné que la feuille de cuivre au molybdène présente une faible perte dans la transmission du signal haute fréquence, elle peut réduire l'atténuation du signal et assurer le fonctionnement efficace du module RF.

De plus, la résistance à haute température de la feuille de cuivre molybdène lui permet de fonctionner de manière stable dans des environnements à haute puissance et à haute température. Les modules RF doivent généralement fonctionner de manière stable sur le long terme. La feuille de cuivre molybdène maintient d'excellentes performances dans ces environnements extrêmes et résiste aux températures élevées prolongées. C'est pourquoi elle est un matériau essentiel pour les modules RF haut de gamme.

7.1.7 Substrat de dissipation thermique des LED

Grâce aux progrès constants de la technologie LED, les sources lumineuses LED sont largement utilisées dans l'éclairage, l'affichage, le traitement du signal et d'autres domaines. Malgré leurs avantages tels

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

qu'une efficacité énergétique élevée et une longue durée de vie, les sources LED génèrent également beaucoup de chaleur lorsqu'elles sont utilisées à haute puissance. Si cette chaleur n'est pas dissipée rapidement et efficacement, les performances des LED se dégradent et leur durée de vie est réduite. La dissipation thermique est donc devenue un enjeu majeur dans l'application des sources lumineuses LED.

Les feuilles de cuivre-molybdène constituent un choix idéal pour résoudre ce problème grâce à leur conductivité thermique élevée, leur bonne résistance mécanique et leur résistance aux températures élevées. Elles allient le point de fusion élevé du molybdène (environ 3 262 °C) à l'excellente conductivité thermique du cuivre. Lorsque la source lumineuse LED fonctionne, elle transfère rapidement et efficacement la chaleur générée par la puce vers le dissipateur thermique ou l'environnement extérieur, évitant ainsi les effets néfastes de l'accumulation de chaleur.

Comparées aux substrats traditionnels en aluminium ou autres matériaux de dissipation thermique, les feuilles de cuivre-molybdène présentent une conductivité thermique supérieure et peuvent supporter une densité de puissance plus élevée. Cela leur permet de maintenir des températures plus basses dans les systèmes de dissipation thermique des sources lumineuses LED haute puissance, telles que les lampes LED haute puissance, les écrans haute luminosité et les diodes laser, améliorant ainsi l'efficacité et la durée de vie des sources lumineuses LED. De plus, le coefficient de dilatation thermique de la feuille de cuivre-molybdène est relativement uniforme, comparable à celui des puces LED et autres matériaux d'emballage. Cela réduit les contraintes dues aux différences de dilatation thermique, améliorant ainsi la stabilité et la fiabilité à long terme des sources lumineuses LED. Dans l'emballage des modules LED et des circuits intégrés, les feuilles de cuivre-molybdène servent non seulement de substrats de dissipation thermique, mais assurent également une dissipation thermique efficace et durable, évitant ainsi la dégradation des performances des sources lumineuses LED due à la surchauffe.

7.2 Application de la tôle de cuivre et de molybdène dans le domaine aérospatial

L'industrie aérospatiale impose des exigences très strictes en matière de matériaux, notamment en cas de températures élevées, de pressions élevées, de rayonnements importants et autres environnements. Ces matériaux doivent présenter une excellente stabilité à haute température, une excellente résistance, une conductivité thermique et une excellente résistance aux rayonnements. Les tôles de cuivre et de molybdène sont largement utilisées dans l'industrie aérospatiale en raison de leurs excellentes performances, notamment dans les composants métalliques d'aéronefs, les matériaux de protection thermique pour engins spatiaux et les composants de missiles et d'engins spatiaux, démontrant ainsi leur rôle irremplaçable.

7.2.1 Composants métalliques d'aéronefs

Les feuilles de cuivre-molybdène jouent un rôle important dans les composants métalliques de l'aéronautique, notamment dans les pièces structurelles des avions. En vol, les avions sont soumis à des vitesses élevées, à des pressions d'air élevées et à des variations de température complexes, ce qui exige des composants métalliques de l'avion une résistance élevée, mais aussi une bonne résistance à la dilatation thermique et à la dissipation thermique. Parmi ces composants métalliques, les feuilles de

cuivre-molybdène sont utilisées pour les composants des structures aéronautiques, tels que les composants moteurs, les éléments de forme aérodynamique et autres composants soumis à des températures et des contraintes élevées. Le point de fusion élevé du molybdène et la conductivité thermique du cuivre permettent aux feuilles de cuivre-molybdène de maintenir une excellente stabilité structurelle dans les environnements à haute température et d'éviter les effets de la dilatation thermique. Parallèlement, les feuilles de cuivre-molybdène peuvent efficacement conduire la chaleur générée par le moteur et les autres composants, prévenir les surchauffes locales et assurer le fonctionnement stable de l'avion dans des conditions extrêmes. La présence de tôles de cuivre-molybdène dans les composants métalliques des avions se reflète également dans leur résistance à la corrosion. Les avions sont exposés à des conditions climatiques variées, notamment dans des environnements à forte humidité et salinité. La résistance à la corrosion des tôles de cuivre-molybdène leur permet de fonctionner longtemps dans ces environnements sans défaillance.

7.2.2 Matériaux de protection thermique pour engins spatiaux

Les engins spatiaux sont soumis à des variations de température extrêmes lors de leur lancement, de leur vol et de leur rentrée atmosphérique. En particulier lors de leur entrée dans l'atmosphère, ils sont soumis à des températures très élevées, pouvant atteindre plusieurs milliers de degrés Celsius. Par conséquent, ils doivent être dotés d'un système de protection thermique performant pour garantir leur fonctionnement et celui de leurs équipements internes. L'utilisation de feuilles de cuivre et de molybdène dans le système de protection thermique des engins spatiaux se reflète principalement dans son utilisation comme matériau de protection thermique. Le point de fusion élevé du molybdène lui confère une stabilité dans les environnements à haute température, tandis que la conductivité thermique du cuivre lui permet de transférer rapidement la chaleur de la surface de l'engin spatial vers d'autres composants, évitant ainsi toute surchauffe locale. Ainsi, les feuilles de cuivre et de molybdène préviennent efficacement les dommages causés par les températures élevées au système de protection thermique des engins spatiaux. Lors de la rentrée atmosphérique, les feuilles de cuivre et de molybdène sont souvent utilisées dans les couches d'isolation thermique, les boucliers thermiques et les systèmes de dissipation thermique. La conductivité thermique élevée des feuilles de cuivre au molybdène garantit que la chaleur peut être rapidement transférée vers d'autres composants de dissipation thermique, tandis que sa forte résistance à la dilatation thermique réduit efficacement la contrainte thermique causée par des différences de température excessives, garantissant que le vaisseau spatial peut maintenir l'intégrité structurelle pendant la rentrée à haute température.

De plus, la résistance à la corrosion des feuilles de cuivre au molybdène est également très adaptée à une utilisation dans des environnements spatiaux, en particulier dans des conditions de rayonnement élevé et de températures extrêmes, les feuilles de cuivre au molybdène peuvent fonctionner de manière stable pendant longtemps.

7.2.3 Composants de missiles et d'engins spatiaux

Les feuilles de cuivre et de molybdène sont également utilisées dans divers composants de missiles et d'engins spatiaux. Dans les systèmes de missiles, elles sont souvent utilisées dans le système de

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

dissipation thermique des moteurs de missiles et autres composants haute température. Les moteurs de missiles génèrent beaucoup de chaleur lors des vols à grande vitesse. Si cette chaleur n'est pas dissipée à temps, elle peut entraîner une baisse des performances du moteur, voire une panne. Les feuilles de cuivre et de molybdène permettent de dissiper rapidement et efficacement la chaleur de ces composants pour assurer le bon fonctionnement du missile. Les feuilles de cuivre et de molybdène sont également largement utilisées dans les systèmes électriques des engins spatiaux. Dans les équipements électroniques, elles servent de composants conducteurs et dissipateurs de chaleur, contribuant à une conduction efficace du courant et à un maintien de la température stable, évitant ainsi les pannes dues à la surchauffe. De plus, leur stabilité et leur grande résistance les rendent également utilisées dans les composants structurels des engins spatiaux, notamment pour les composants clés soumis à d'importantes contraintes mécaniques et à de fortes variations de température. Elles offrent ainsi une résistance et une durabilité accrues.

7.2.4 Radiateur du système radar

Les systèmes radar, notamment ceux des secteurs militaire et aéronautique, doivent fonctionner de manière stable et durable dans des conditions de puissance et de fréquence élevées. Dans cet environnement, la dissipation thermique des systèmes radar devient un enjeu majeur lors de leur conception. L'utilisation de feuilles de cuivre-molybdène dans les radiateurs des systèmes radar exploite pleinement leur conductivité thermique élevée et leur stabilité à haute température, devenant ainsi un composant essentiel des systèmes radar hautes performances. Les unités d'émission et de réception du système radar génèrent beaucoup de chaleur, et une dissipation thermique efficace est essentielle à son bon fonctionnement. Les feuilles de cuivre-molybdène sont largement utilisées dans la conception de systèmes radar pour leur dissipation thermique en raison de leur conductivité thermique élevée (supérieure à celle de la plupart des métaux traditionnels). Les matériaux composites en cuivre-molybdène peuvent transférer rapidement la chaleur des composants générateurs de chaleur (tels que les émetteurs, les récepteurs, etc.) vers le système de dissipation thermique externe, évitant ainsi toute surchauffe susceptible d'entraîner une dégradation des performances ou une panne du système radar. La feuille de cuivre-molybdène assure une bonne stabilité thermique dans les environnements à haute température, ainsi que l'intégrité et la stabilité structurelles face aux fluctuations extrêmes de température et aux chocs thermiques importants. De plus, son coefficient de dilatation thermique est similaire à celui d'autres matériaux utilisés dans les systèmes radar (tels que la céramique, les puces de silicium, etc.), ce qui permet de réduire efficacement les contraintes dues aux différences de dilatation thermique et d'éviter les déformations mécaniques ou les défaillances structurelles dues aux différences de température. Dans les systèmes radar militaires, l'utilisation de la feuille de cuivre-molybdène comme dispositif de dissipation thermique, notamment pour les radars haute puissance et haute fréquence, garantit un fonctionnement efficace et stable à long terme des équipements radar et prévient les dommages ou la dégradation des performances dus à la surchauffe. C'est pourquoi la feuille de cuivre-molybdène joue un rôle important dans la technologie radar moderne.

7.2.5 Emballage électronique militaire

Les emballages électroniques militaires sont soumis à des exigences très strictes en matière de matériaux, notamment pour les équipements fonctionnant dans des environnements difficiles, tels que les missiles,

les satellites et les drones. Ces emballages doivent répondre à de multiples exigences, telles que la résistance aux hautes températures, aux chocs, aux radiations, ainsi qu'à l'eau et à la poussière. Nouveau matériau d'emballage, la feuille de cuivre-molybdène est largement utilisée dans les emballages électroniques militaires en raison de ses excellentes propriétés physiques. L'un de ses principaux avantages est sa haute conductivité thermique. Les composants électroniques génèrent beaucoup de chaleur en fonctionnement, notamment dans les environnements à haute puissance et haute fréquence, où la gestion thermique est primordiale. La feuille de cuivre-molybdène transfère efficacement la chaleur des composants électroniques vers le système de dissipation thermique externe afin d'éviter toute défaillance due à une surchauffe. Ceci est essentiel à la fiabilité des équipements militaires, notamment dans des environnements extrêmes tels que les températures, les pressions et les radiations élevées. La feuille de cuivre-molybdène assure la stabilité à long terme des emballages électroniques.

molybdène est également idéale pour l'emballage électronique militaire. Les équipements militaires sont souvent soumis à des conditions difficiles, telles que des variations brutales de température, des chocs et des vibrations. La feuille de cuivre et de molybdène résiste à ces conditions sans dégradation ni dommage. Sa résistance et sa rigidité élevées garantissent la résistance du matériau d'emballage aux contraintes externes. Parallèlement, son coefficient de dilatation thermique est comparable à celui de nombreux autres matériaux militaires (tels que la céramique et les métaux), réduisant ainsi l'impact des contraintes thermiques sur la structure de l'emballage.

Dans les emballages électroniques militaires, les feuilles de cuivre-molybdène servent non seulement à dissiper la chaleur, mais aussi à améliorer les performances électriques. Leur excellente conductivité permet de les utiliser comme supports pour les composants électroniques, garantissant ainsi la stabilité des connexions électriques et de la transmission des signaux. Leur utilisation dans les emballages militaires améliore efficacement les performances, la fiabilité et la durabilité des équipements, garantissant ainsi leur fonctionnement stable dans des environnements extrêmes.

7.3 Application de la feuille de cuivre-molybdène dans la gestion de l'énergie et de la chaleur

molybdène ont démontré leurs avantages uniques dans le secteur de l'énergie, notamment dans l'électronique de puissance et les systèmes de gestion thermique. Face à l'accent mis à l'échelle mondiale sur l'efficacité énergétique et le développement durable, les feuilles de cuivre et de molybdène sont de plus en plus utilisées dans ce secteur, notamment dans l'électronique de puissance et les systèmes de gestion thermique, devenant ainsi un matériau essentiel pour résoudre le problème de dissipation thermique des équipements électroniques de forte puissance.

7.3.1 Dispositifs électroniques de puissance

Les dispositifs électroniques de puissance jouent un rôle essentiel dans les systèmes énergétiques modernes. Qu'il s'agisse de conversion d'énergie, de systèmes de gestion de batteries, de véhicules électriques ou de systèmes d'énergie renouvelable, ils sont largement utilisés pour la régulation, le contrôle et la conversion d'énergie. Cependant, ces dispositifs électroniques de forte puissance génèrent beaucoup de chaleur en fonctionnement. Une dissipation thermique insuffisante peut entraîner une

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

surchauffe, une dégradation des performances, voire une panne. Par conséquent, d'excellents matériaux de gestion thermique sont essentiels à la fiabilité de fonctionnement des dispositifs électroniques de puissance. Les feuilles de cuivre-molybdène jouent un rôle irremplaçable dans la gestion thermique de ces dispositifs. Leur conductivité thermique extrêmement élevée permet d'évacuer rapidement la chaleur générée par les dispositifs électroniques de puissance, maintenant ainsi leur température stable, améliorant ainsi leur efficacité et leur durée de vie. Leur conductivité thermique élevée et leur stabilité à haute température en font un matériau de dissipation thermique idéal pour les dispositifs électroniques de puissance, notamment pour les appareils de forte puissance et à longue durée de vie. De plus, la résistance élevée des feuilles de cuivre-molybdène et leur grande résistance à la dilatation thermique leur permettent de supporter de fortes variations de température et les contraintes mécaniques des dispositifs électroniques de puissance. Dans les véhicules électriques et les équipements de conversion de puissance, les feuilles de cuivre-molybdène peuvent soutenir et protéger efficacement les composants électroniques tout en offrant une bonne dissipation thermique pour éviter les dommages causés par des températures excessives.

Molybdène utilisées dans les dispositifs électroniques de puissance améliorent non seulement les performances de gestion thermique des équipements, mais aussi leur efficacité globale et réduisent les pertes d'énergie. Avec le développement des véhicules électriques, de la production d'énergie solaire et des systèmes de stockage d'énergie, l'importance des feuilles de cuivre et de molybdène comme matériaux de gestion thermique ne cessera de croître, devenant un matériau technique clé pour améliorer l'efficacité énergétique et le développement durable.

7.3.2 Équipements nucléaires

Les équipements nucléaires, notamment les réacteurs nucléaires et leurs composants, nécessitent des matériaux présentant une stabilité thermique, une robustesse et une résistance aux radiations extrêmement élevées. Les réacteurs nucléaires génèrent d'importantes quantités de chaleur en fonctionnement et sont également exposés à de forts rayonnements. La gestion de la dissipation thermique dans les équipements nucléaires est donc cruciale. Les feuilles de cuivre-molybdène, utilisées comme matériaux de gestion thermique dans les équipements nucléaires, sont devenues un choix idéal pour résoudre les problèmes de gestion thermique à haute température et à forte puissance grâce à leur excellente conductivité thermique et à leur stabilité à haute température.

Dans les équipements nucléaires, les tôles de cuivre et de molybdène sont principalement utilisées dans les échangeurs de chaleur, les systèmes de refroidissement et les radiateurs. Une grande quantité de chaleur est générée au cœur du réacteur nucléaire, et les tôles de cuivre et de molybdène peuvent rapidement conduire cette chaleur et la dissiper efficacement, assurant ainsi le bon fonctionnement des équipements à haute température. Le point de fusion élevé du molybdène lui permet de résister à des températures extrêmement élevées, tandis que sa bonne conductivité thermique assure une conduction rapide de la chaleur du cœur du réacteur nucléaire vers le système de refroidissement. De plus, leur résistance mécanique et à la corrosion élevées leur assurent un fonctionnement stable et durable dans les équipements nucléaires. Certains composants importants des équipements nucléaires, tels que les barres de contrôle des réacteurs nucléaires, les pompes de refroidissement et les échangeurs de chaleur, sont

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

exposés à des températures élevées et à des radiations élevées sur une longue durée. La stabilité et la résistance à la corrosion des tôles de cuivre et de molybdène leur permettent de résister aux radiations et d'assurer la fiabilité et la stabilité à long terme des équipements.

À l'avenir, avec le développement de la technologie nucléaire, l'utilisation de tôles de cuivre et de molybdène dans les nouveaux réacteurs nucléaires, tels que les réacteurs à haute température refroidis au gaz et les réacteurs à neutrons rapides, augmentera. Ces tôles offriront des solutions de gestion thermique plus efficaces et plus fiables pour les équipements nucléaires, garantissant ainsi la durabilité et la sûreté de la technologie nucléaire dans les futurs systèmes énergétiques.

7.3.3 Systèmes d'énergie renouvelable

Face à la demande mondiale croissante d'énergies respectueuses de l'environnement et durables, les énergies renouvelables (solaire, éolienne, hydraulique, etc.) sont devenues une source d'énergie importante. Dans les systèmes d'énergie renouvelable, notamment les systèmes de production d'énergie solaire et éolienne, une gestion thermique efficace est essentielle pour améliorer l'efficacité du système, prolonger sa durée de vie et garantir la stabilité des équipements. Les feuilles de cuivre-molybdène, utilisées comme matériaux de gestion thermique dans les systèmes d'énergie renouvelable, sont devenues des matériaux clés pour améliorer l'efficacité de la conversion énergétique et la stabilité des équipements grâce à leur excellente conductivité thermique et leur résistance aux températures élevées. Dans les systèmes d'énergie solaire, les feuilles de cuivre-molybdène sont principalement utilisées dans les échangeurs de chaleur et les composants de dissipation thermique des systèmes de production d'énergie solaire thermique. Les capteurs solaires génèrent beaucoup de chaleur en fonctionnement. Si cette chaleur ne peut pas être dissipée efficacement, l'efficacité du système peut diminuer, voire endommager le capteur solaire. Les feuilles de cuivre-molybdène peuvent transférer rapidement la chaleur du capteur vers le système de refroidissement externe afin d'assurer le bon fonctionnement du système de production d'énergie thermique. Dans les systèmes de production d'énergie éolienne, les feuilles de cuivre-molybdène, utilisées comme matériaux de dissipation thermique pour les moteurs de ventilateurs et autres équipements électroniques de forte puissance, permettent de transférer efficacement la chaleur générée pendant le fonctionnement du moteur de l'intérieur du ventilateur vers l'extérieur, évitant ainsi toute surchauffe et panne. Les composants électroniques et les convertisseurs de puissance des systèmes de production d'énergie éolienne génèrent généralement beaucoup de chaleur lors d'un fonctionnement à grande vitesse. Grâce à leur conductivité thermique élevée, les feuilles de cuivre-molybdène améliorent efficacement la dissipation thermique du système et garantissent la stabilité de l'éolienne à haute puissance. Molybdène ne se limite pas aux échangeurs de chaleur et aux composants de dissipation thermique. Elle joue également un rôle important dans la gestion des batteries des systèmes d'énergie renouvelable. Dans les systèmes solaires et éoliens, les systèmes de stockage d'énergie (tels que les packs de batteries) sont un composant indispensable. En tant que matériau de gestion thermique, la feuille de cuivre-molybdène permet de réduire efficacement la chaleur générée par la batterie pendant les processus de charge et de décharge, et d'empêcher la surchauffe de la batterie, ce qui pourrait entraîner une dégradation ou une détérioration de ses performances. Avec les progrès constants des technologies des énergies renouvelables, l'application de la feuille de cuivre-molybdène dans ces systèmes se généralisera,

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

offrant des solutions de gestion thermique essentielles pour une utilisation efficace et un fonctionnement stable des énergies renouvelables.

7.3.4 Gestion thermique des batteries de véhicules électriques

Les véhicules électriques (VE) sont devenus une source d'énergie alternative importante dans les systèmes de transport modernes. L'un des composants clés des véhicules électriques est leur système de batterie, en particulier la batterie d'alimentation. Les batteries génèrent beaucoup de chaleur lors de la charge et de la décharge. Si cette chaleur n'est pas gérée efficacement, la température de la batterie sera trop élevée, ce qui affectera ses performances, sa durée de vie et même sa sécurité. Par conséquent, le système de gestion thermique de la batterie est devenu un élément essentiel de la conception des véhicules électriques, incontournable.

Matériau clé du système de gestion thermique des batteries de véhicules électriques, la feuille de cuivre-molybdène est idéale pour cette gestion grâce à sa conductivité thermique élevée et à sa résistance aux températures élevées. Dans les véhicules électriques, elle peut être utilisée dans le système de dissipation thermique des batteries, notamment lors des charges et décharges à haute puissance. Elle transfère rapidement la chaleur générée par la batterie de la cellule vers le radiateur ou le système de refroidissement externe, évitant ainsi une température excessive, source de dégradation des performances ou de problèmes de sécurité. Son excellente conductivité thermique garantit le maintien de la batterie dans une plage de température de fonctionnement optimale, améliore l'efficacité de charge et de décharge, et prolonge sa durée de vie. Les batteries des véhicules électriques sont confrontées à des défis variés dans des environnements à hautes et basses températures. La feuille de cuivre-molybdène s'adapte à ces conditions extrêmes et offre une gestion thermique stable. En améliorant la dissipation thermique du système de batterie, la feuille de cuivre-molybdène optimise non seulement son efficacité, mais aussi les performances globales et la sécurité des véhicules électriques. Elle peut également être utilisée dans la conception structurelle des modules et packs de batteries des véhicules électriques. Sa haute résistance et sa bonne résistance à la dilatation thermique lui permettent d'assurer un support structurel stable au module de batterie et d'éviter toute déformation mécanique due aux variations de température. Ses excellentes performances garantissent un fonctionnement stable et durable du système de batterie, même à haute température et à forte puissance, répondant ainsi aux exigences strictes des véhicules électriques en matière d'autonomie, de vitesse de charge et de sécurité.

7.4 Feuille de cuivre et de molybdène dans d'autres domaines d'application émergents

Molybdène dans les domaines émergents ont démontré leurs avantages uniques dans des conditions de travail de haute précision et complexes, en particulier dans les domaines techniques qui ont des exigences extrêmement élevées en matière de performances des matériaux.

7.4.1 Équipement médical

L'utilisation de feuilles de cuivre et de molybdène dans les équipements médicaux est principalement répandue dans les domaines de l'imagerie médicale, de la radiothérapie et du diagnostic in vitro. Avec les

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

progrès de la technologie médicale, notamment le développement de la radiologie, de la médecine nucléaire et des équipements de diagnostic de haute précision, les feuilles de cuivre et de molybdène sont devenues un matériau clé pour les équipements médicaux grâce à leur excellente conductivité thermique, leur résistance et leur biocompatibilité. Dans les équipements d'imagerie médicale, notamment les scanners (TDM) et les IRM (imagerie par résonance magnétique), les feuilles de cuivre et de molybdène sont généralement utilisées comme matériaux de dissipation thermique dans le système de gestion thermique des composants électroniques et des équipements de forte puissance. Les scanners et les équipements d'IRM génèrent beaucoup de chaleur en fonctionnement, notamment dans les systèmes radiofréquence et les composants électroniques de forte puissance. Si la chaleur ne peut pas être dissipée efficacement, l'équipement peut surchauffer et affecter la qualité de l'image. La conductivité thermique élevée des feuilles de cuivre et de molybdène permet de transférer rapidement la chaleur générée par ces composants vers le système de dissipation thermique, garantissant ainsi un fonctionnement stable à long terme de l'équipement. Les feuilles de cuivre-molybdène sont également utilisées pour la gestion thermique des équipements de radiothérapie. Lors d'une radiothérapie, la source de rayonnement de l'équipement génère généralement beaucoup de chaleur. Le rôle des feuilles de cuivre-molybdène dans ces dispositifs est de transférer efficacement la chaleur de la zone de la source de rayonnement afin d'éviter toute défaillance de l'équipement ou toute diminution de la précision du traitement due à l'accumulation de chaleur. Leur grande solidité, leur résistance aux hautes températures et leur stabilité en font des matériaux très fiables pour les dispositifs médicaux de haute précision. Leur utilisation dans les équipements de diagnostic in vitro est également essentielle. Dans ces dispositifs, les feuilles de cuivre-molybdène assurent non seulement une gestion thermique efficace, mais servent également de matériaux de support pour garantir la stabilité et la précision de l'équipement lors d'une utilisation à long terme.

7.4.2 Station de base de communication 7G

Avec la popularisation de la technologie 5G, la recherche et le développement de la technologie de communication 7G battent leur plein. La communication 7G favorisera la transmission ultra-rapide, les connexions à grande échelle et les applications réseau à faible latence. En tant qu'infrastructure centrale des futurs réseaux de communication, les stations de base 7G ont des exigences plus élevées en matière de gestion thermique, d'anti-interférences et de stabilité des équipements. En tant que matériau de gestion thermique efficace, la feuille de cuivre-molybdène devient progressivement un composant important des stations de base de communication 7G.

Dans les stations de base de communication 7G, la principale fonction des feuilles de cuivre molybdène est de dissiper la chaleur générée par les stations de base. La technologie de communication 7G permettra des transmissions de données à plus haute fréquence et à plus grande capacité, et la demande énergétique et la charge thermique des stations de base seront supérieures à celles de la 5G. La conductivité thermique élevée des feuilles de cuivre molybdène leur permet de dissiper rapidement la chaleur générée par les composants électroniques de la station de base, évitant ainsi toute surchauffe susceptible d'entraîner une panne de l'équipement ou une dégradation des performances. Outre la dissipation thermique, la capacité anti-interférence électromagnétique des feuilles de cuivre-molybdène constitue également l'un des avantages de leur application dans les stations de base de communication 7G. Ces stations seront

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

confrontées à un environnement électromagnétique plus complexe. En tant que matériau de support structurel, les feuilles de cuivre-molybdène isolent efficacement les interférences électromagnétiques et garantissent le fonctionnement stable des composants électroniques de la station de base. L'utilisation de feuilles de cuivre-molybdène dans les stations de base améliorera considérablement la fiabilité et la qualité de communication des équipements et répondra aux exigences strictes des futurs réseaux de transmission à très haut débit.

7.4.3 Laser et système optique

Les lasers et les systèmes optiques sont largement utilisés dans la recherche scientifique, les traitements médicaux, les procédés industriels, l'impression laser et d'autres domaines. Avec les progrès constants de la technologie laser, leur puissance ne cesse de croître, tout comme les exigences en matière de dissipation thermique et de contrôle de la température. Les feuilles de cuivre-molybdène jouent un rôle important dans les lasers et les systèmes optiques en tant que matériaux de dissipation thermique efficaces. Les lasers, en particulier les lasers de haute puissance, génèrent une chaleur importante pendant leur fonctionnement. Si cette chaleur n'est pas dissipée efficacement, l'efficacité du laser sera fortement réduite, voire l'équipement endommagé. La conductivité thermique élevée de la feuille de cuivre-molybdène en fait un matériau idéal pour le système de dissipation thermique du laser. Elle permet de transférer rapidement la chaleur générée par le laser de l'intérieur vers le dispositif de dissipation thermique externe, de maintenir la température de fonctionnement du laser stable et d'améliorer la puissance de sortie et l'efficacité opérationnelle de l'équipement.

Les feuilles de cuivre-molybdène sont également largement utilisées dans les systèmes optiques, notamment les systèmes de balayage laser, les systèmes de communication optique et les équipements de mesure de précision. Les émetteurs et récepteurs laser des systèmes optiques doivent généralement fonctionner dans des environnements à température contrôlée extrêmement précise. Les feuilles de cuivre-molybdène permettent non seulement une dissipation thermique stable, mais aussi d'éviter efficacement la déformation des composants optiques due aux différences de dilatation thermique, garantissant ainsi la stabilité et la précision du système optique. L'utilisation de feuilles de cuivre-molybdène dans les lasers et les systèmes optiques permet non seulement d'améliorer la capacité de dissipation thermique du système, mais aussi d'améliorer la qualité et la stabilité du faisceau laser, garantissant ainsi son bon fonctionnement dans divers scénarios d'application.

7.4.4 Fabrication additive et composants personnalisés

La fabrication additive (impression 3D) est l'une des technologies de fabrication qui a connu un développement rapide ces dernières années. Notamment dans les secteurs de l'aérospatiale, du médical et de l'automobile, elle s'est progressivement imposée comme une solution de fabrication de composants personnalisés de haute précision. Parmi les matériaux utilisés en fabrication additive, les feuilles de cuivre-molybdène sont largement utilisées pour la fabrication de composants personnalisés haute température, haute puissance et haute précision.

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

La technologie de fabrication additive permet de fabriquer des pièces de formes complexes en empilant les matériaux couche par couche, ce qui est très efficace pour la fabrication de géométries complexes impossibles à obtenir par les procédés traditionnels. Les excellentes propriétés de la feuille de cuivre-molybdène en font un matériau idéal pour la fabrication additive, notamment pour les applications exigeant une conductivité thermique élevée, une résistance mécanique élevée et une bonne résistance aux températures élevées, telles que les composants aéronautiques, les composants de moteurs automobiles et les pièces personnalisées pour dispositifs médicaux.

Grâce au procédé de fabrication additive, la feuille de cuivre-molybdène conserve une bonne stabilité structurelle lors de la fusion laser et d'excellentes propriétés physiques dans des environnements à haute température. La fabrication sur mesure de feuilles de cuivre-molybdène permet une meilleure gestion thermique des composants structurels complexes et une fabrication efficace des composants en réduisant les contraintes thermiques et en améliorant les performances.

De plus, la fabrication additive de tôles de cuivre-molybdène permet d'ajuster précisément les performances en fonction des exigences des différentes applications, répondant ainsi aux exigences de nombreux produits industriels en matière de gestion thermique, de résistance mécanique, de résistance aux hautes températures et de résistance à la corrosion. Les tôles de cuivre-molybdène offrent ainsi de vastes perspectives d'application dans des domaines émergents et deviennent un matériau clé pour la fabrication de composants sur mesure.



Image de la feuille de cuivre et de molybdène CTIA GROUP LTD

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

Chapitre 8 Statut du marché et de l'industrie des tôles de cuivre et de molybdène

8.1 Aperçu du marché mondial des feuilles de cuivre et de molybdène

Filière importante du marché des alliages de molybdène, le marché mondial des tôles de cuivre et de molybdène a connu une croissance soutenue ces dernières années grâce à ses atouts uniques pour les applications hautes performances. Ce matériau composite, composé de molybdène (Mo) et de cuivre (Cu), présente une conductivité thermique élevée, un coefficient de dilatation thermique ajustable et une résistance élevée. Largement utilisé dans l'électronique, l'aérospatiale, les communications et les nouvelles énergies, il est principalement porté par la demande mondiale de matériaux hautes performances, notamment pour les communications 5G, les véhicules électriques (VE) et les équipements d'énergie renouvelable. La croissance du marché des tôles de cuivre et de molybdène est plus marquée que celle du marché global du molybdène. La croissance du marché global du molybdène est relativement lente, tandis que l'importance des tôles de cuivre et de molybdène dans les secteurs à forte valeur ajoutée (tels que les encapsulations électroniques et les composants de gestion thermique) ne cesse de croître, favorisant ainsi l'expansion de son marché.

Molybdène est principalement stimulé par les facteurs clés suivants. Premièrement, la demande de matériaux à haute conductivité thermique et à faible dilatation thermique est en hausse. La conductivité thermique des feuilles de cuivre molybdène varie de 150 à 270 W/ m·K et leur coefficient de dilatation thermique réglable est de 5 à 12×10^{-6} /K, ce qui en fait un matériau idéal pour les applications de conditionnement électronique et de gestion thermique. Par exemple, dans les stations de base 5G, les feuilles de cuivre molybdène Mo60Cu40 sont largement utilisées comme substrats de dissipation thermique en raison de leur excellente conductivité thermique et de leur dilatation thermique compatible avec les substrats céramiques, garantissant la stabilité des équipements en fonctionnement haute fréquence. Deuxièmement, la croissance rapide du marché des véhicules électriques (VE) a stimulé la demande de feuilles de cuivre molybdène.

Les systèmes de gestion de batterie et les semi-conducteurs de puissance des véhicules électriques nécessitent des matériaux de gestion thermique performants. Les feuilles de cuivre-molybdène constituent le choix privilégié en raison de leur conductivité thermique élevée et de leur fiabilité. De plus, le développement des énergies renouvelables, comme les équipements éoliens et solaires, a accru la demande de feuilles de cuivre-molybdène. Par exemple, ces feuilles sont utilisées dans la couche conductrice des cellules solaires à couches minces pour assurer le bon fonctionnement des équipements d'énergie propre. Enfin, la demande d'alliages hautes performances dans les secteurs de l'aérospatiale et de la défense ne cesse de croître. La légèreté et la stabilité à haute température des feuilles de cuivre-molybdène ont conduit à leur utilisation dans les moteurs à réaction et les composants de missiles. Par exemple, les feuilles de cuivre-molybdène Mo85Cu15 conviennent parfaitement aux composants de gestion thermique aérospatiale grâce à leur faible coefficient de dilatation thermique et à leurs excellentes propriétés mécaniques.

Le marché mondial des feuilles de cuivre molybdène est segmenté selon les applications : électronique, aérospatiale, optoélectronique et nouvelles énergies. Dans le secteur électronique, les feuilles de cuivre

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

molybdène sont largement utilisées dans les substrats de dissipation thermique des semi-conducteurs de puissance, des amplificateurs RF et des stations de base 5G, en raison de leur conductivité thermique élevée et de leur faible coefficient de dilatation thermique. Par exemple, le Mo60Cu40 convient aux équipements de communication haute fréquence grâce à sa conductivité d'environ 30 à 40 % IACS (International Annealed Copper Standard). Le secteur aérospatial est un autre marché important, où les feuilles de cuivre molybdène sont utilisées pour la fabrication de composants de gestion thermique de moteurs à réaction et de missiles, tandis que le Mo85Cu15 est privilégié pour sa stabilité à haute température (résistance à 600-800 °C) et sa légèreté. Dans le secteur de l'optoélectronique, les feuilles de cuivre et de molybdène sont utilisées comme supports pour les puces laser et LED. Le Mo70Cu30 présente une excellente compatibilité thermique avec des matériaux tels que l'arséniure de gallium, garantissant ainsi la stabilité à long terme du dispositif. Face à la croissance rapide de la demande dans le secteur des nouvelles énergies, les feuilles de cuivre et de molybdène jouent un rôle essentiel dans les systèmes de gestion des batteries des véhicules électriques et des batteries solaires à couches minces. Par exemple, elles permettent la production de cellules solaires en cuivre-indium-gallium-sélénium (CIGS) comme couche conductrice. La diversité des exigences de ces secteurs d'application a stimulé l'expansion continue du marché des feuilles de cuivre et de molybdène. Ce marché se divise en alliages de cuivre et de molybdène, dont les proportions varient selon la marque, tels que Mo85Cu15, Mo70Cu30, Mo60Cu40 et Mo50Cu50. Le Mo85Cu15 présente une teneur élevée en molybdène et un faible coefficient de dilatation thermique (environ $5-7 \times 10^{-6}/K$), ce qui le rend adapté aux applications aérospatiales et optoélectroniques et nécessite une parfaite adéquation avec les matériaux céramiques ou semi-conducteurs. Le Mo70Cu30 offre un équilibre parfait entre conductivité thermique et propriétés mécaniques et est largement utilisé dans les stations de base 5G et les substrats de dissipation thermique des véhicules électriques. Les Mo60Cu40 et Mo50Cu50 présentent une teneur élevée en cuivre et une conductivité thermique de 220-270 W/m·K, ce qui les rend adaptés aux équipements électroniques haute fréquence et aux nouveaux domaines énergétiques. Les différences de performances entre les différentes marques permettent aux feuilles de cuivre-molybdène de répondre à divers besoins d'application et d'améliorer la compétitivité du marché.

Le marché des tôles de cuivre et de molybdène se divise principalement en deux catégories : la fabrication directe et la distribution. La fabrication directe correspond à l'approvisionnement direct des fabricants aux utilisateurs finaux, une pratique courante dans les grandes entreprises de l'électronique et de l'aérospatiale. Le canal de distribution distribue les produits aux petites et moyennes entreprises par l'intermédiaire d'intermédiaires, couvrant ainsi un marché plus large. Les distributeurs privilégient la compétitivité des coûts et la fiabilité de la chaîne d'approvisionnement pour garantir des livraisons rapides. Par exemple, des distributeurs en Amérique du Nord et en Europe fournissent des tôles de cuivre et de molybdène personnalisées aux secteurs de l'automobile et des nouvelles énergies afin de répondre à divers besoins. La combinaison de la fabrication directe et des canaux de distribution optimise la couverture du marché et favorise la popularisation des tôles de cuivre et de molybdène. Le marché mondial des tôles de cuivre et de molybdène est dominé par la Chine, les États-Unis et le Chili, et les fournisseurs ont consolidé leurs positions grâce à l'innovation technologique et à la coopération stratégique. Par exemple, China Molybdenum a renforcé son contrôle sur la chaîne d'approvisionnement en investissant dans les minéraux étrangers et la transformation en aval. Des entreprises américaines produisent des tôles de cuivre et de molybdène de haute pureté grâce à l'exploitation minière de minéraux

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

associés au cuivre-molybdène pour alimenter les marchés de l'aérospatiale et de l'électronique. De plus, les fournisseurs ont amélioré leur compétitivité sur le marché en développant de nouveaux matériaux composites molybdène-cuivre (tels que le Mo70Cu30 avec ajout de graphène) pour améliorer la conductivité thermique et la résistance de l'interface.

8.2 Principaux fabricants de tôles de cuivre et de molybdène - CTIA GROUP LTD

GROUPE CTIA LTD est une filiale de China Tungsten Online Technology Co., Ltd. Fondée en 1997, CTIA a débuté avec www.chinatungsten.com, premier site web chinois dédié aux produits en tungstène haut de gamme, et est la première entreprise de commerce électronique chinoise spécialisée dans les industries du tungstène, du molybdène et des terres rares. Forte de près de trois décennies d'expertise technique approfondie et d'une réputation internationale dans le domaine du tungstène et du molybdène, CTIA est devenue l'un des principaux fabricants mondiaux de tôles de cuivre-molybdène. Elle s'engage à promouvoir une conception et une fabrication intelligentes, intégrées et flexibles de ces matériaux à l'ère de l'Internet industriel. Elle produit diverses nuances de tôles de cuivre-molybdène, telles que Mo85Cu15, Mo80Cu20, Mo60Cu40 et Mo50Cu50, largement utilisées dans les substrats de dissipation thermique électronique, les composants de gestion thermique aérospatiale, les équipements de communication 5G et les dispositifs optoélectroniques.

CTIA GROUP LTD hérite de la technologie et de l'expérience de China Tungsten Online, se concentre sur les besoins personnalisés des clients, utilise la technologie de l'IA et la plate-forme Internet industrielle pour collaborer avec les clients pour concevoir et produire des feuilles de cuivre au molybdène qui répondent à une composition chimique et des propriétés physiques spécifiques (telles qu'une densité d'environ 9,1-10,0 g/cm³, une conductivité thermique de 150-270 W/ m·K, une conductivité électrique de 20-45% IACS, un coefficient de dilatation thermique de $5-12 \times 10^{-6}$ / K), fournissant des services intégrés de processus complets depuis l'ouverture du moule, la production d'essai jusqu'à la finition, l'emballage et la logistique.

Par exemple, la tôle de cuivre molybdène Mo60Cu40 qu'elle produit est largement utilisée dans les dissipateurs thermiques des modules RF des stations de base 5G en raison de sa conductivité thermique élevée et de sa bonne ductilité ; le Mo85Cu15 est utilisé dans les composants de gestion thermique des réacteurs aérospatiaux en raison de sa faible dilatation thermique et de sa résistance élevée. CTIA GROUP LTD produit des tôles de cuivre molybdène par métallurgie des poudres et infiltration en fusion. La métallurgie des poudres garantit une densité et des propriétés mécaniques élevées (telles que la résistance à la traction du Mo85Cu15 atteint 500-600 MPa), et la méthode d'infiltration en fusion optimise la conductivité thermique et la conductivité électrique des nuances à haute teneur en cuivre.

Au cours des 30 dernières années, China Tungsten Online a fourni des services de R&D, de conception et de production pour plus de 500 000 produits en tungstène et en molybdène à plus de 130 000 clients dans le monde entier, couvrant l'Europe, l'Amérique, l'Asie, l'île Maurice, Chypre et d'autres régions, jetant les bases d'une fabrication personnalisée, flexible et intelligente. Fort de ce constat, CTIA GROUP LTD a approfondi la fabrication intelligente à l'ère de l'Internet industriel, développé des systèmes intelligents de gestion de la production, amélioré la cohérence des produits grâce à des technologies de

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

frittage et de traitement automatisées, et satisfait aux exigences de haute précision des secteurs de l'électronique, des communications et des nouvelles énergies. L'entreprise répond activement aux normes mondiales ESG (environnementales, sociales et de gouvernance) et adopte des technologies d'extraction et de traitement durables, telles que la réduction de la consommation de ressources par le recyclage des déchets de molybdène et de cuivre, répondant ainsi aux exigences du « 14e Plan quinquennal » chinois pour une fabrication verte. Son réseau de chaîne d'approvisionnement couvre l'Amérique du Nord, l'Europe et l'Asie, et assure une livraison mondiale efficace grâce à une coopération stratégique et à des plateformes de commerce électronique (telles que www.ctia.com.cn).

La compétitivité de CTIA GROUP LTD se reflète également dans le contrôle des coûts et la production à grande échelle, en particulier avec les abondantes ressources en molybdène de la Chine et le soutien du gouvernement, elle continue d'augmenter sa capacité de production pour répondre aux besoins de croissance des marchés des infrastructures, de la 5G et des véhicules électriques.

8.3 Demande du marché et tendance de développement des tôles de cuivre et de molybdène

des feuilles de cuivre molybdène est porté par l'industrialisation mondiale et les progrès technologiques, notamment dans les domaines de l'électronique, des communications, de l'aérospatiale et des nouvelles énergies. L'industrie électronique constitue la principale source de demande. Les feuilles de cuivre molybdène sont largement utilisées dans les semi-conducteurs de puissance, les dispositifs à micro-ondes et les dissipateurs thermiques en raison de leur conductivité thermique élevée et de leur faible coefficient de dilatation thermique. En 2023, la demande mondiale de feuilles de cuivre molybdène de l'industrie électronique représentait une part significative du marché total. Le développement rapide des communications 5G a stimulé la demande de feuilles de cuivre molybdène haute fréquence, utilisées pour les amplificateurs de puissance RF et les substrats d'antennes afin de garantir l'intégrité du signal et la stabilité thermique. La croissance rapide de l'industrie des véhicules électriques a également considérablement stimulé la demande. Les feuilles de cuivre molybdène sont utilisées pour les composants de dissipation thermique des systèmes de gestion de batterie et des modules de puissance. La croissance des ventes mondiales de véhicules électriques en 2023 a stimulé la demande de matériaux connexes. Les énergies renouvelables, comme l'éolien et le solaire, devraient consommer une grande quantité d'alliages de cuivre et de molybdène d'ici 2050 pour la couche d'absorption des cellules solaires et les composants résistants à la corrosion des éoliennes. Antaike China prévoit que l'industrie éolienne consommera environ 300 000 tonnes de molybdène. L'industrie aérospatiale connaît une demande stable en tôles de cuivre et de molybdène à haute résistance et faible dilatation thermique. Des nuances telles que Mo85Cu15 sont utilisées dans les moteurs à réaction et les composants de gestion thermique des satellites. En termes de tendances de développement, l'essor des technologies d'impression 3D et de fabrication additive a ouvert de nouvelles applications pour les tôles de cuivre et de molybdène, notamment pour les composants aérospatiaux de précision et les équipements médicaux. De plus, les technologies de production intelligente et de fabrication verte ont favorisé l'optimisation des procédés de production de tôles de cuivre et de molybdène, notamment en améliorant la régularité des produits grâce au contrôle automatisé du frittage. La région Asie-Pacifique continuera de dominer la croissance de la demande, et le « 14e plan quinquennal » de la Chine, qui soutient la fabrication haut de gamme et la

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

construction d'infrastructures, devrait encore augmenter la consommation de tôles de cuivre et de molybdène.

8.4 Défis et opportunités du marché des tôles de cuivre et de molybdène

Défi

Les feuilles de cuivre et de molybdène reposent sur deux matières premières clés, le molybdène et le cuivre, dont les prix sont influencés par l'économie mondiale, l'équilibre de l'offre et de la demande et les facteurs géopolitiques, et sont très volatils. Le molybdène est généralement extrait comme sous-produit des mines de cuivre et de tungstène, et les fluctuations du prix du cuivre affectent directement l'offre de molybdène. Ces fluctuations de prix augmentent la pression sur les coûts pour les fabricants de feuilles de cuivre et de molybdène, en particulier dans les industries électronique et aérospatiale qui nécessitent une chaîne d'approvisionnement stable, ce qui peut entraîner une compression des marges bénéficiaires ou une réduction de la compétitivité du marché. Les préoccupations mondiales concernant la protection de l'environnement ont incité les pays à renforcer la supervision de l'extraction et de la transformation, notamment en Chine et en Amérique du Nord. En 2023, la production de molybdène en Amérique du Nord a diminué en raison de la baisse des teneurs en minerai de cuivre-molybdène et de réglementations environnementales strictes (telles que les normes d'émission aux États-Unis et au Canada), limitant la capacité de production de feuilles de cuivre et de molybdène. En Chine, la stricte supervision gouvernementale des autorisations d'exploitation minière (notamment la révision de la loi sur la protection de l'environnement) a entraîné une augmentation des coûts d'exploitation, notamment en exigeant l'utilisation d'équipements à faibles émissions et de technologies de traitement des eaux usées. Bien que ces réglementations aient amélioré la gouvernance environnementale, elles ont accru les coûts de mise en conformité des producteurs de feuilles de cuivre et de molybdène, ce qui pourrait entraîner la sortie du marché de petites et moyennes entreprises.

Les tôles de cuivre-molybdène, caractérisées par une conductivité thermique élevée et un faible coefficient de dilatation thermique, sont uniques dans les domaines de l'électronique et de l'aérospatiale. Cependant, d'autres matériaux tels que le vanadium, le tungstène et le chrome présentent un potentiel compétitif dans certaines applications. Par exemple, le tungstène peut remplacer partiellement les tôles de cuivre-molybdène dans les environnements à haute température grâce à son point de fusion plus élevé (environ 3 422 °C), notamment dans les composants aérospatiaux. L'utilisation du vanadium dans les alliages d'acier à haute résistance pourrait affaiblir la demande indirecte de tôles de cuivre-molybdène dans le domaine du renforcement de l'acier, tandis que l'utilisation du chrome dans les revêtements résistants à la corrosion pourrait remplacer la demande de tôles de cuivre-molybdène dans certaines applications de l'industrie chimique. Les avantages en termes de coût ou l'optimisation des performances de ces matériaux alternatifs dans des scénarios spécifiques pourraient entraîner une perte partielle de parts de marché des tôles de cuivre-molybdène. Par exemple, l'utilisation de feuilles de cuivre-molybdène dans les substrats de dissipation thermique des stations de base 5G pourrait être compromise par les composites à base de tungstène, notamment sur les marchés sensibles aux coûts. De plus, l'utilisation croissante de matériaux céramiques (tels que le nitrure d'aluminium) dans les boîtiers électroniques pourrait menacer la demande de nuances telles que le Mo70Cu30. Dans certaines régions, notamment

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

sur les marchés émergents comme le Moyen-Orient et l'Afrique, la méconnaissance des avantages des feuilles de cuivre-molybdène limite la pénétration du marché. De nombreux utilisateurs potentiels (tels que les fabricants de produits électroniques de petite et moyenne taille) ne connaissent pas la conductivité thermique (150-270 W/ m·K) et le coefficient de dilatation thermique ajustable ($5-12 \times 10^{-6}/K$) des feuilles de cuivre-molybdène, ce qui les incite à privilégier les matériaux traditionnels comme le cuivre pur ou l'aluminium. De plus, l'instabilité de la chaîne d'approvisionnement constitue un autre défi majeur. Les tensions géopolitiques et les problèmes logistiques peuvent interrompre l'approvisionnement en molybdène et en cuivre, affectant la production de feuilles de cuivre et de molybdène. Les retards de transport et les goulots d'étranglement portuaires peuvent encore exacerber les risques liés à la chaîne d'approvisionnement, ce qui peut entraîner des retards dans la livraison des feuilles de cuivre et de molybdène et affecter les plans de production dans les industries aérospatiale et électronique.

Opportunité

Le développement rapide des industries mondiales des nouvelles énergies et de l'électronique offre de vastes perspectives au marché des feuilles de cuivre molybdène. Grâce à leur conductivité thermique élevée et à leur faible coefficient de dilatation thermique, les feuilles de cuivre molybdène sont largement utilisées dans les véhicules électriques (VE), les équipements de communication 5G et les équipements d'énergie renouvelable. Par exemple, dans le secteur des véhicules électriques, les feuilles de cuivre molybdène Mo60Cu40 sont utilisées comme substrats de dissipation thermique dans les systèmes de gestion de batterie afin d'assurer la stabilité des batteries en fonctionnement à haute puissance. Dans le domaine des communications 5G, les feuilles de cuivre molybdène (comme le Mo70Cu30) sont largement utilisées dans les amplificateurs RF des stations de base et les semi-conducteurs de puissance, grâce à leur conductivité électrique (environ 30 à 40 % IACS) et à leur dilatation thermique compatible avec les substrats céramiques, garantissant ainsi la stabilité de la transmission des signaux haute fréquence. La demande d'équipements pour les énergies renouvelables stimule également la croissance du marché. Par exemple, les feuilles de cuivre-molybdène sont utilisées comme couche conductrice des cellules solaires à couches minces de cuivre-indium-gallium-sélénium (CIGS) afin d'améliorer l'efficacité de la production d'énergie solaire. La croissance rapide de ces nouveaux domaines d'application assure une demande stable pour le marché des feuilles de cuivre-molybdène. L'innovation technologique a ouvert de nouveaux relais de croissance pour ce marché. Les technologies d'extraction avancées (comme l'hydrométallurgie) ont amélioré le taux de récupération du molybdène et réduit les coûts de production. Les progrès de la fabrication additive (impression 3D) ont permis de produire des pièces de formes complexes à partir de feuilles de cuivre-molybdène, notamment dans les secteurs aérospatial et médical. Par exemple, les composites molybdène-cuivre produits par impression 3D par fusion par faisceau d'électrons (EBM) présentent une densité élevée et une résistance aux fissures élevée, et conviennent aux pièces aérospatiales haute température, telles que les aubes de turbine en Mo85Cu15.

De plus, l'application de la technologie nanocomposite (par exemple, l'ajout de graphène au Mo70Cu30) améliore la conductivité thermique et la résistance de l'interface, élargissant ainsi l'application des feuilles de cuivre-molybdène à la fabrication de précision. Par exemple, la demande de feuilles de cuivre-molybdène hautes performances pour les cibles à rayons X et les dissipateurs thermiques dans le domaine médical est en hausse. Ces innovations technologiques améliorent non seulement les performances des

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

feuilles de cuivre-molybdène, mais réduisent également le gaspillage de matière lors de la production et renforcent la compétitivité du marché.

Le 14e Plan quinquennal de la Chine met l'accent sur la modernisation de la production et le développement de nouvelles énergies, ce qui accroît la demande de feuilles de cuivre et de molybdène. Par exemple, dans les projets de réseaux intelligents et de trains à grande vitesse, le Mo60Cu40 est utilisé pour fabriquer des composants conducteurs performants. De plus, l'urbanisation rapide et l'expansion de l'industrie électronique dans les pays d'Asie-Pacifique comme l'Inde et le Japon ont encore élargi le marché. Ces demandes régionales offrent aux fournisseurs des opportunités de marché diversifiées, notamment pour les applications à forte valeur ajoutée. La tendance à la fabrication verte, axée sur le recyclage des déchets de cuivre et de molybdène, offre également de nouvelles perspectives de marché. L'utilisation de feuilles de cuivre et de molybdène dans les équipements d'énergie renouvelable s'inscrit dans les objectifs mondiaux de réduction des émissions de carbone. Par exemple, dans les éoliennes et les cellules solaires, la résistance à la corrosion et la conductivité thermique des feuilles de cuivre et de molybdène prolongent la durée de vie des équipements.



Image de la feuille de cuivre et de molybdène CTIA GROUP LTD

CTIA GROUP LTD

Molybdenum Copper Sheets Introduction

1. Overview of Molybdenum Copper Sheets

Molybdenum-copper (Mo-Cu) sheets are composite materials composed of molybdenum and copper. Thanks to their unique combination of thermal, electrical, and mechanical properties, as well as their tunability, Mo-Cu sheets are widely used in fields such as thermal management, high-performance electronic devices, semiconductors, and aerospace. They are commonly utilized as packaging materials, integrated circuit substrates, heat sinks, and LED thermal dissipation substrates. At CTIA GROUP LTD, we can customize molybdenum-copper products with specific dimensions and compositions according to customer requirements.

2. Features of Molybdenum Copper Sheets

Excellent Electrical Conductivity: Suitable for applications requiring efficient electrical connections.

High Thermal Conductivity: Capable of rapid heat transfer, ideal for electronic devices that require effective thermal dissipation.

Low Coefficient of Thermal Expansion: Highly compatible with semiconductor materials like silicon, helping to minimize thermal stress caused by temperature fluctuations and preventing deformation or damage to components.

Good Workability: Can be processed through cutting and other techniques into parts of various sizes and shapes to meet diverse application needs.

3. Typical Properties of Molybdenum-Copper Alloys

Material Composition	Density (g/cm ³)	Thermal Conductivity (W/M·K at 25°C)	Thermal Expansion Coefficient (10 ⁻⁶ /°C)
Mo85Cu15	10.00	160-180	6.8
Mo80Cu20	9.90	170-190	7.7
Mo70Cu30	9.80	180-200	9.1
Mo60Cu40	9.66	210-250	10.3
Mo50Cu50	9.54	230-270	11.5

4. Production Method of Molybdenum Copper Sheets

The preparation of molybdenum-copper sheets is primarily carried out using the infiltration method, which takes advantage of molybdenum's high melting point and copper's excellent fluidity. In this process, copper is infiltrated into a molybdenum preform at high temperatures, resulting in the formation of a dense molybdenum-copper composite material.

5. Purchasing Information

Email: sales@chinatungsten.com; Phone: +86 592 5129595; 592 5129696

Website: molybdenum-copper.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 9 Développement futur des tôles de cuivre et de molybdène

9.1 Potentiel d'une nouvelle technologie de préparation des tôles de cuivre et de molybdène

S'appuyant sur les méthodes traditionnelles de métallurgie des poudres et d'infiltration par fusion, la technologie de préparation des [feuilles de cuivre-molybdène](#) évolue vers l'intelligence, l'écologie et une haute efficacité. Grâce aux progrès de la science des matériaux et des technologies de fabrication, de nouvelles technologies de préparation ont montré un fort potentiel. La fabrication additive (impression 3D) représente une voie importante. Grâce à la fusion laser sur lit de poudre ou par faisceau d'électrons, des pièces de forme complexe en feuilles de cuivre-molybdène, telles que des composants de gestion thermique pour l'aéronautique ou des dissipateurs thermiques pour appareils à micro-ondes, peuvent être imprimées directement. La technologie d'impression 3D permet un contrôle précis du rapport molybdène-cuivre et de la microstructure, optimise la conductivité thermique (150-270 W/ m·K) et électrique, et réduit le gaspillage de matériaux. Par exemple, en fondant couche par couche de poudre de Mo60Cu40, il est possible de fabriquer un dissipateur thermique doté de canaux internes complexes pour répondre aux exigences de charge thermique élevée des équipements 5G.

La technologie des nanocomposites constitue un autre domaine d'intérêt. L'introduction de phases de renforcement nanométriques (comme le graphène ou les nanotubes de carbone) à l'interface molybdène-cuivre permet d'améliorer la résistance de l'interface et la conductivité thermique. Par exemple, l'ajout de graphène au Mo70Cu30 peut augmenter la conductivité thermique à 260 W/ m·K tout en maintenant un faible coefficient de dilatation thermique ($8-10 \times 10^{-6}/K$). De plus, les technologies de production intelligentes, telles que l'optimisation des procédés assistée par l'IA et le contrôle automatisé du frittage, améliorent la densité et la constance des performances des feuilles molybdène-cuivre grâce à la surveillance en temps réel des paramètres de température et de pression, et conviennent à la production à grande échelle de nuances à forte teneur en cuivre comme le Mo50Cu50. Les technologies de fabrication vertes ont également suscité beaucoup d'attention, comme l'utilisation de déchets recyclables de molybdène-cuivre comme matières premières et la réduction de la consommation d'énergie grâce au frittage à basse température ou à la technologie de frittage au plasma, qui répond aux normes mondiales ESG (environnementales, sociales et de gouvernance).

CTIA GROUP LTD a commencé à explorer ces technologies et à utiliser la plateforme Internet industrielle pour obtenir une intelligence complète du processus, de la conception à la production. Par exemple, l'IA permet de concevoir collaborativement des tôles de cuivre et de molybdène Mo85Cu15 afin de répondre aux besoins spécifiques des composants aérospatiaux haute température. Ces nouvelles technologies devraient réduire les coûts de production, raccourcir les cycles et améliorer les performances des produits, ouvrant ainsi de nouvelles perspectives pour les tôles de cuivre et de molybdène dans les applications hautes performances.

9.2 Orientations de recherche pour optimiser les performances des tôles en cuivre-molybdène

[Les feuilles de cuivre et de molybdène](#) visent à améliorer la conductivité thermique, la conductivité électrique, les propriétés mécaniques et l'adaptabilité environnementale afin de répondre aux exigences

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

strictes des secteurs de l'électronique, de l'aérospatiale et des nouvelles énergies. L'optimisation de l'interface est au cœur de nos préoccupations. En améliorant la qualité de liaison de l'interface molybdène-cuivre, la résistance thermique et la résistance de contact électrique sont réduites. Par exemple, le dépôt chimique en phase vapeur (CVD) est utilisé pour déposer une couche de transition à la surface des particules de molybdène afin d'améliorer la conductivité thermique du Mo60Cu40 à plus de 250 W/ m·K , tout en augmentant la résistance à la traction à 400 MPa. La conception des alliages est une autre orientation importante. L'ajout d'oligo-éléments (tels que le rhénium ou le titane) peut améliorer la résistance aux hautes températures et à l'oxydation des feuilles de cuivre et de molybdène. Par exemple, l'ajout d'une petite quantité de rhénium au Mo85Cu15 permet de maintenir sa stabilité structurelle à 800 °C, ce qui est adapté aux composants des moteurs à réaction aéronautiques. La régulation de la microstructure a également retenu l'attention. En contrôlant l'uniformité de la répartition des phases molybdène et cuivre, le coefficient de dilatation thermique ($5-12 \times 10^{-6}/K$) est optimisé pour s'adapter au matériau céramique. Par exemple, la microstructure du Mo80Cu20 est ajustée par frittage plasma afin de réduire les contraintes thermiques et de prolonger la durée de vie des boîtiers électroniques. Les technologies de modification de surface, telles que la pulvérisation cathodique magnétron pour le dépôt de couches minces de cuivre-molybdène, peuvent améliorer les performances de contact électrique et la résistance à la corrosion, et conviennent à l'application de feuilles de molybdène-cuivre haute fréquence dans les modules RF 5G.

L'application de la science des matériaux computationnelle ouvre une nouvelle voie pour l'optimisation des performances. La simulation des propriétés thermiques et mécaniques des alliages molybdène-cuivre permet de prédire le rapport de composition optimal. Par exemple, la simulation de dynamique moléculaire permet d'optimiser la distribution de la phase cuivre du Mo50Cu50 et d'augmenter la conductivité à 45 % IACS. L'optimisation des performances écologiques est également au cœur des préoccupations, avec l'étude des procédés de préparation à faible consommation d'énergie et des matériaux recyclables pour réduire l'impact environnemental. Par exemple, le recyclage des déchets molybdène-cuivre pour produire du Mo70Cu30 permet de réduire les coûts de production et d'améliorer la durabilité. Ces axes de recherche favorisent l'application des tôles molybdène-cuivre dans les domaines de haute performance grâce à l'innovation technologique et à l'intégration interdisciplinaire.

9.3 Expansion des applications intersectorielles des tôles de cuivre et de molybdène

Les feuilles de cuivre et de molybdène connaissent un essor rapide. Bénéficiant de leur conductivité thermique élevée, de leur faible dilatation thermique et de leurs excellentes propriétés mécaniques, elles se sont progressivement étendues des secteurs traditionnels de l'électronique et de l'aérospatiale aux nouveaux secteurs de l'énergie, de la médecine et de la défense. Dans ce secteur, les feuilles de cuivre et de molybdène sont largement utilisées dans les systèmes de gestion des batteries des véhicules électriques et les équipements d'énergie renouvelable en raison de leur conductivité thermique élevée et de leur résistance à la corrosion. Par exemple, le Mo60Cu40 est utilisé pour les substrats de dissipation thermique des modules de puissance des véhicules électriques afin de gérer efficacement les charges thermiques élevées ; le Mo70Cu30 est utilisé pour les couches d'absorption des cellules solaires et les composants résistants à la corrosion des éoliennes. On prévoit que l'industrie éolienne consommera une grande quantité d'alliages de cuivre et de molybdène d'ici 2050.

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

Dans le domaine médical, la biocompatibilité et la haute résistance des feuilles de cuivre-molybdène les distinguent dans la fabrication d'équipements médicaux. Par exemple, le Mo85Cu15 est utilisé dans les composants de dissipation thermique des appareils à rayons X pour garantir leur stabilité dans des environnements à fort rayonnement ; les feuilles de cuivre-molybdène imprimées en 3D peuvent être utilisées pour fabriquer des composants de gestion thermique pour des dispositifs médicaux implantables de précision. L'utilisation de feuilles de cuivre- molybdène dans le secteur de la défense est également en plein essor. Le Mo80Cu20 convient aux dissipateurs thermiques des systèmes de missiles et de radars grâce à sa faible dilatation thermique et à sa haute résistance, répondant aux exigences des environnements à haute température et à fortes vibrations. Le calcul haute performance et l'intelligence artificielle ont ouvert de nouveaux marchés aux feuilles de cuivre-molybdène. La conductivité thermique et électrique élevée du Mo50Cu50 en fait un choix idéal pour les substrats de dissipation thermique des puces de serveurs de centres de données, prenant en charge la technologie de packaging 3D haute densité.

De plus, de nouvelles applications des feuilles de cuivre-molybdène dans le domaine de l'optoélectronique continuent de se développer, notamment le Mo70Cu30 pour les lasers haute puissance et les supports de puces LED afin d'optimiser la gestion thermique et les performances des contacts électriques. L'expansion intersectorielle bénéficie également de nouvelles technologies de préparation, telles que l'impression 3D et la technologie des nanocomposites, qui permettent de personnaliser des structures complexes avec des feuilles de cuivre-molybdène pour répondre aux exigences de précision des secteurs médical et militaire. À l'avenir, avec l'accent mis à l'échelle mondiale sur l'efficacité énergétique et la fabrication intelligente, le potentiel d'application des feuilles de cuivre-molybdène dans les échangeurs de chaleur nucléaires, les piles à combustible et les terminaux intelligents sera encore davantage exploité, stimulant ainsi la croissance de son marché.



Image de la feuille de cuivre et de molybdène CTIA GROUP LTD

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

Chapitre 10 Normes nationales et internationales pour les tôles de cuivre et de molybdène

10.1 Norme nationale chinoise pour les tôles en cuivre et molybdène

Les normes nationales chinoises fournissent des orientations normatives pour la production, les essais et l'application des tôles de cuivre-molybdène afin de garantir la qualité des produits et la cohérence industrielle. Actuellement, la principale norme relative aux tôles de cuivre-molybdène est la norme industrielle YS/T 1546-2022 « Tôles en alliage de cuivre-molybdène », gérée par le ministère de l'Industrie et des Technologies de l'information. Publiée le 30 septembre 2022 et entrée en vigueur le 1er avril 2023, elle porte le numéro de dépôt 88796-2023. Cette norme s'applique aux tôles en alliage de cuivre-molybdène à l'état déformé, recuit et infiltré, couvrant les nuances courantes telles que Mo85Cu15, Mo80Cu20 et Mo70Cu30. Elle spécifie la composition chimique, les propriétés physiques (telles que la densité et la conductivité thermique) et les exigences de traitement. Elle est adaptée aux substrats de dissipation thermique et aux composants conducteurs dans les domaines de l'emballage électronique, de l'aérospatiale et des communications.

Par exemple, la norme exige que la densité du Mo70Cu30 soit d'environ 9,6 g/cm³, la conductivité thermique d'environ 200-250 W/ m·K et le coefficient de dilatation thermique d'environ 8-10×10⁻⁶/K afin de garantir la compatibilité avec les matériaux céramiques. De plus, la norme YS/T 660-2022 « Marques et composition chimique des produits de traitement du molybdène et des alliages de molybdène » fournit également une référence pour la composition chimique des feuilles de cuivre-molybdène, clarifiant la plage de teneur en molybdène et en cuivre et les exigences en matière de contrôle des impuretés. Parmi les autres normes pertinentes, citons la norme YS/T 1562.1-2022 « Méthodes d'analyse chimique des alliages de cuivre-tungstène Partie 1 : Détermination de la teneur en cuivre par numérisation à l'iode et spectrométrie d'émission atomique à plasma inductif », qui fournit un support méthodologique pour la détection de la composition des feuilles de cuivre-molybdène. Ces normes sont supervisées par l'Association chinoise de l'industrie des métaux non ferreux et le Comité technique national de normalisation des métaux non ferreux (TC243) afin de garantir la conformité avec les exigences de l'industrie manufacturière haut de gamme du 14e Plan quinquennal du pays. Des entreprises comme CTIA GROUP LTD appliquent scrupuleusement ces normes pour produire des tôles de cuivre-molybdène répondant aux besoins des secteurs de l'électronique et de l'aérospatiale.

10.2 Normes internationales pour les tôles de cuivre et de molybdène

Les normes internationales fournissent des spécifications uniformes pour la production et le commerce des tôles de cuivre-molybdène sur le marché mondial. Cependant, l'Organisation internationale de normalisation (ISO) et la Commission électrotechnique internationale (CEI) n'ont pas encore publié de normes indépendantes spécifiques aux tôles de cuivre-molybdène. Les exigences pertinentes sont généralement intégrées aux normes relatives aux alliages de molybdène ou aux matériaux composites. Les normes ISO 1554:1976 et ISO 1553:1976 (Méthodes d'analyse chimique des alliages de cuivre traités et coulés et du cuivre pur) fournissent des références pour la détermination de la teneur en cuivre des tôles de cuivre-molybdène. La teneur en cuivre est analysée par électrolyse afin de garantir l'exactitude de la composition chimique. Ces normes sont partiellement reprises par la norme chinoise YS/T 1562.1-

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

2022 pour la détection de la teneur en cuivre de nuances telles que Mo60Cu40. De plus, la norme ISO 9001 relative au système de gestion de la qualité est largement utilisée dans le contrôle qualité des fabricants de tôles de cuivre-molybdène afin de garantir la constance des performances des produits. Par exemple, CTIA GROUP LTD a obtenu la certification ISO 9001 et optimisé le processus de production du Mo50Cu50 pour répondre aux besoins des équipements de communication 5G. Les normes internationales incluent également des exigences environnementales et de sécurité, telles que le système de gestion environnementale ISO 14001, qui exige la réduction des déchets et de la consommation d'énergie dans le processus de production, conformément aux normes ESG mondiales. Bien qu'il n'existe pas de normes internationales spécifiques aux tôles de cuivre-molybdène, les fabricants de tôles de cuivre-molybdène se réfèrent généralement aux normes ISO/TC 119 (métallurgie des poudres) et ISO/TC 26 (cuivre et alliages de cuivre), combinées aux exigences contractuelles des clients, pour personnaliser les paramètres de performance tels que la conductivité thermique (150-270 W/ m·K) et le coefficient de dilatation thermique ($5-12 \times 10^{-6}/K$). À l'avenir, à mesure que l'application des tôles de cuivre-molybdène se développera dans les nouvelles énergies et l'électronique, l'ISO pourrait formuler des normes plus spécifiques pour réguler le marché mondial.

Normes relatives aux tôles de cuivre et de molybdène en Europe, en Amérique, au Japon, en Corée du Sud et dans d'autres pays du monde

aux tôles de cuivre et de molybdène reposent généralement sur leurs propres systèmes de normes de matériaux ou spécifications industrielles. Les tôles de cuivre et de molybdène étant des matériaux d'application spécifiques, il existe peu de normes spécifiques et les exigences pertinentes sont intégrées aux normes des alliages de cuivre, des alliages de molybdène ou des matériaux composites. Aux États-Unis, les normes de l'American Society for Testing and Materials (ASTM), telles que la norme ASTM B777 (norme pour les alliages de tungstène haute densité), fournissent des références indirectes pour les tests de performance des tôles de cuivre et de molybdène. Bien qu'elles ne ciblent pas directement les tôles de cuivre et de molybdène, leurs méthodes d'essai (telles que la densité et la résistance à la traction) sont applicables au contrôle qualité de nuances telles que le Mo85Cu15. Les entreprises américaines intègrent souvent les exigences de personnalisation de leurs clients pour produire des tôles de cuivre et de molybdène répondant aux besoins de l'aérospatiale, comme le Mo80Cu20 pour les composants de gestion thermique des satellites, avec une conductivité thermique d'environ 170-200 W/ m·K. En Europe, le Comité européen de normalisation (CEN) réglemente indirectement les exigences de traitement des tôles de cuivre-molybdène via la norme EN 13599 (plaques et bandes de cuivre et d'alliages de cuivre), en mettant l'accent sur la composition chimique et les propriétés mécaniques (telles que la résistance à la traction de 400 à 600 MPa). L'Institut allemand de normalisation (DIN) fournit également des directives similaires. Certaines entreprises se réfèrent à la norme DIN EN ISO 6892-1 pour réaliser des essais de traction sur des tôles de cuivre-molybdène afin de garantir que la résistance et la ductilité du Mo70Cu30 répondent aux exigences des boîtiers électroniques.

Au Japon, les normes industrielles japonaises (JIS), telles que la JIS H 3100 (feuilles et bandes de cuivre et d'alliages de cuivre), fournissent des références pour la production de feuilles de cuivre molybdène, mettant l'accent sur la conductivité électrique et thermique. Les feuilles de cuivre molybdène Mo60Cu40 produites par les entreprises japonaises sont largement utilisées dans les équipements de communication

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

haute fréquence, avec une conductivité électrique d'environ 30 à 40 % IACS. L'Agence coréenne pour la technologie et les normes (KATS) produit des feuilles de cuivre molybdène qui répondent aux besoins des nouvelles énergies, comme le Mo50Cu50 pour les modules de puissance des véhicules électriques, conformément aux normes internationales et aux contrats clients. Ces pays adaptent généralement les paramètres de performance des feuilles de cuivre molybdène en fonction des normes ISO et des pratiques industrielles, et garantissent la qualité et la conformité environnementale grâce aux certifications ISO 9001 et ISO 14001 . Les entreprises européennes, américaines, japonaises et coréennes coopèrent également avec des fabricants chinois tels que CTIA GROUP LTD, en utilisant la norme chinoise YS/T 1546-2022 comme référence pour garantir la cohérence des produits sur le marché mondial.



Image de la feuille de cuivre et de molybdène CTIA GROUP LTD

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

Annexe : Glossaire des termes relatifs aux feuilles de cuivre et de molybdène

le terme	définition	Exemples d'application
Feuille de cuivre et de molybdène	Le molybdène (Mo) et le cuivre (Cu) dans un rapport spécifique sont préparés par métallurgie des poudres ou infiltration en fusion et présentent une conductivité thermique élevée, un faible coefficient de dilatation thermique et une résistance élevée.	La feuille de cuivre au molybdène Mo70Cu30 est utilisée pour le substrat de dissipation thermique de la station de base 5G, et sa conductivité thermique est d'environ 200 à 250 W/ m·K .
molybdène	Métal de transition à point de fusion élevé, avec une excellente résistance aux températures élevées et à la corrosion, un faible coefficient de dilatation thermique et fournit un support structurel.	le squelette structurel des feuilles de cuivre-molybdène dans les composants aérospatiaux à haute température .
cuivre	Métaux hautement conducteurs et thermoconducteurs (conductivité thermique d'environ 401 W/ m·K , conductivité électrique d'environ 100 % IACS), formant un réseau thermoconducteur et électrique et améliorant la ductilité.	La phase de cuivre dans Mo60Cu40 améliore la conductivité électrique et convient aux dissipateurs thermiques des équipements de communication.
Marque	Indique le pourcentage massique ou volumique de molybdène et de cuivre dans les feuilles de molybdène-cuivre, telles que Mo85Cu15.	Le Mo85Cu15 est utilisé dans l'aérospatiale et le Mo50Cu50 est utilisé dans les équipements électroniques haute fréquence.
Conductivité thermique	Mesure de la capacité des feuilles de cuivre-molybdène à conduire la chaleur, mesurée en W/ m·K , qui augmente avec la teneur en cuivre.	La conductivité thermique du Mo50Cu50 est de 220 à 270 W/ m·K et est utilisée pour les substrats de dissipation thermique des semi-conducteurs de puissance.
Coefficient de dilatation thermique	Il indique le taux d'expansion de la feuille de cuivre au molybdène lorsque la température change, l'unité est 10^{-6} /K, qui diminue avec l'augmentation de la teneur en molybdène.	Le CTE du Mo85Cu15 est d'environ $5-7 \times 10^{-6}$ /K, ce qui correspond au matériau céramique et réduit les contraintes thermiques.
Conductivité	Mesure de la capacité d'une feuille de cuivre-molybdène à conduire le courant, exprimée en pourcentage d'IACS, qui augmente avec la teneur en cuivre.	La conductivité du Mo60Cu40 est d'environ 30 à 40 % IACS, ce qui convient aux équipements de communication haute fréquence.
Propriétés mécaniques	au molybdène sous charge triaxiale ou cycle thermique reflète la résistance à la fatigue.	Le Mo70Cu30 présente une bonne ténacité grâce à sa teneur élevée en cuivre et convient aux

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

		environnements à fortes vibrations dans l'aérospatiale.
Résistance à la corrosion	au molybdène destinée à résister à la corrosion par des milieux corrosifs est principalement dominée par la phase molybdène.	Le Mo85Cu15 fonctionne bien dans les environnements marins et convient aux composants de gestion thermique aérospatiale.
Propriétés antioxydantes	Feuille de cuivre et de molybdène pour résister à la réaction d'oxydation dans un environnement contenant de l'oxygène à haute température.	Le Mo80Cu20 reste structurellement stable à 600°C et convient aux appareils électroniques à haute température.
Résistance aux acides et aux alcalis	molybdène en milieux acides ou alcalins.	Le Mo85Cu15 fonctionne bien dans les acides non oxydants tels que l'acide chlorhydrique et convient aux pièces de l'industrie chimique.
Métallurgie des poudres	de molybdène -cuivre obtenues par mélange de poudre de molybdène et de poudre de cuivre, pressage et frittage à haute température (1000-1400°C).	Le Mo85Cu15 est produit par métallurgie des poudres et a une résistance à la traction de 500 à 600 MPa.
Méthode d'infiltration	de molybdène -cuivre par infiltration de cuivre fondu dans un squelette poreux de molybdène conviennent aux nuances à haute teneur en cuivre.	Le Mo50Cu50 optimise la conductivité thermique grâce à l'infiltration de matière fondue et convient aux dissipateurs thermiques des équipements de communication 5G.
Frittage à chaud	Variante de la métallurgie des poudres, qui améliore la densité et les propriétés mécaniques des feuilles de cuivre-molybdène grâce au frittage à haute température et haute pression .	La dureté Vickers du Mo80Cu20 atteint 160-200 HV, ce qui convient aux composants aérospatiaux à haute température.
Feuille de cuivre-molybdène haute fréquence	Les feuilles de cuivre au molybdène sont spécialement conçues pour les équipements électroniques haute fréquence , avec une conductivité électrique et thermique élevée.	Le Mo60Cu40 est utilisé dans les amplificateurs de puissance RF et a une conductivité d'environ 30 à 40 % IACS.
Feuille de cuivre et de molybdène pour l'aérospatiale	Les feuilles de cuivre-molybdène conçues pour l'industrie aérospatiale ont une faible dilatation thermique et une résistance élevée.	Le Mo85Cu15 est utilisé dans les composants de gestion thermique des moteurs à réaction et peut fonctionner de manière stable à 600-800°C.

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

Dispositif photoélectrique de type feuille de cuivre et de molybdène	Les feuilles de cuivre-molybdène conçues pour les dispositifs optoélectroniques ont une conductivité thermique élevée et un coefficient de dilatation thermique correspondant.	Le Mo70Cu30 est utilisé pour le substrat de dissipation thermique laser haute puissance et correspond à l'arséniure de gallium.
Fiches de données de sécurité	Un document qui fournit des informations de sécurité sur les feuilles de cuivre et de molybdène, décrivant la composition chimique, les dangers potentiels et les directives de manipulation.	La fiche de données de sécurité de China Tungsten Intelligence recommande de porter un masque anti-poussière pour éviter l'inhalation de poussière pendant le traitement.
Fabrication intelligente	Utilisez la technologie de l'IA et l'Internet industriel pour optimiser la production de feuilles de cuivre au molybdène et améliorer la cohérence et l'efficacité.	CTIA GROUP LTD produit du Mo50Cu50 grâce à un contrôle de frittage automatisé pour répondre aux besoins des équipements 5G.
Fabrication additive	Grâce à la technologie d'impression 3D, des feuilles de cuivre-molybdène peuvent être produites et les déchets de matériaux peuvent être réduits.	Le Mo60Cu40 est transformé en dissipateurs thermiques complexes grâce à l'impression 3D, ce qui convient au domaine aérospatial.
Technologie des nanocomposites	L'introduction de phases de nano-renforcement à l'interface molybdène-cuivre peut améliorer la conductivité thermique et la résistance de l'interface.	atteint 260 W/ m·K après ajout de graphène.
Normes ESG	Les normes environnementales, sociales et de gouvernance mondiales exigent que la production de feuilles de cuivre et de molybdène réduise la consommation d'énergie et les déchets.	Recycler les déchets de molybdène-cuivre pour produire du Mo70Cu30.
YS/T 1546-2022	La norme industrielle chinoise « Plaque en alliage molybdène-cuivre » spécifie la composition chimique et les propriétés physiques.	Le Mo70Cu30 a une densité d'environ 9,6 g/cm ³ et convient à l'emballage électronique et à l'aérospatiale.
ISO 9001	Normes internationales de système de gestion de la qualité, utilisées pour le contrôle de la qualité des entreprises de production de tôles de cuivre et de molybdène.	L'entreprise a obtenu la certification ISO 9001 et a optimisé le processus de production de Mo50Cu50.
ISO 14001	Les normes internationales de gestion de l'environnement exigent que la production de feuilles de cuivre et de molybdène réduise l'impact environnemental.	La technologie de frittage à basse température est utilisée pour produire des feuilles de cuivre et de molybdène afin de réduire la consommation d'énergie.

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

Références

- [1] Organisation internationale de normalisation. (1976). ISO 1553:1976 : Cuivre non allié contenant au moins 99,90 % de cuivre – Détermination de la teneur en cuivre – Méthode électrolytique. Genève, Suisse : ISO.
- [2]Organisation internationale de normalisation. (1976). ISO 1554:1976 : Alliages de cuivre corroyés et coulés – Détermination de la teneur en cuivre – Méthode électrolytique. Genève, Suisse : ISO.
- [3] Organisation internationale de normalisation. (2015). ISO 9001:2015 : Systèmes de management de la qualité – Exigences. Genève, Suisse : ISO.
- [4]Organisation internationale de normalisation. (2015). ISO 14001:2015 : Systèmes de management environnemental – Exigences et lignes directrices pour son utilisation. Genève, Suisse : ISO.
- [5]Callister , WD, & Rethwisch, DG (2020). Science et ingénierie des matériaux : une introduction (10e éd.). Hoboken, NJ : Wiley.ASM International. (1990). Manuel ASM, Volume 2 : Propriétés et sélection : Alliages non ferreux et matériaux spéciaux. Materials Park, OH : ASM International.

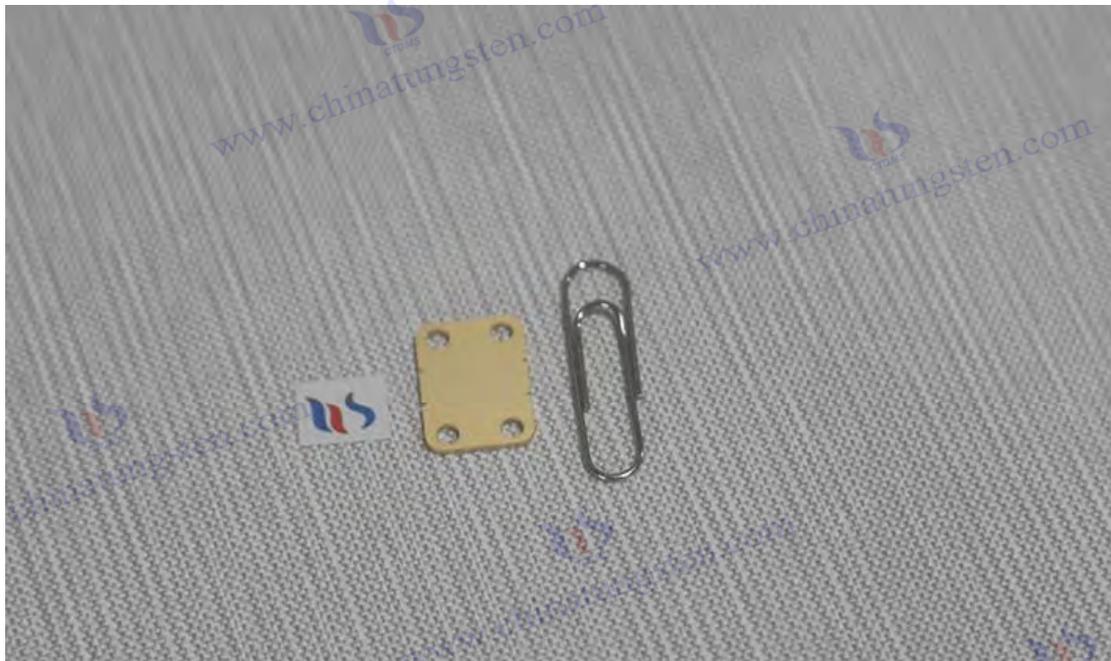


Image de la feuille de cuivre et de molybdène CTIA GROUP LTD

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