

Qu'est - ce qu'un élément chauffant MoSi_2

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



COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

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

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

Table des matières

Chapitre 1 Introduction

- 1.1 Présentation des éléments chauffants MoSi₂
- 1.2 Historique du développement des éléments chauffants MoSi₂
- 1.3 État d'application des éléments chauffants MoSi₂
- 1.4 Industries d'application des éléments chauffants MoSi₂

Chapitre 2 Caractéristiques des éléments chauffants en MoSi₂ et leurs facteurs d'influence

- 2.1 Propriétés physiques des éléments chauffants en MoSi₂
- 2.2 Résistivité des éléments chauffants en MoSi₂
- 2.3 Caractéristiques de résistance à haute température des éléments chauffants en MoSi₂
- 2.4 Résistance à l'oxydation à haute température des éléments chauffants en MoSi₂
- 2.5 Conductivité thermique et diffusivité thermique des éléments chauffants en MoSi₂
- 2.6 Stabilité aux chocs thermiques des éléments chauffants en MoSi₂
- 2.7 Stabilité aux chocs thermiques des éléments chauffants en MoSi₂
- 2.8 Performances en fatigue thermique des éléments chauffants en MoSi₂
- 2.9 État de surface de l'élément chauffant MoSi₂
 - 2.9.1 Types de revêtements protecteurs couramment utilisés
 - 2.9.2 Étude des fissures de surface et de l'adhérence du revêtement
 - 2.9.3 Formation et protection du film d'oxyde SiO₂ de surface
- 2.10 Problèmes de surface des éléments chauffants en MoSi₂ et leurs solutions
- 2.11 Facteurs affectant les propriétés thermodynamiques des éléments chauffants en MoSi₂
 - 2.11.1 Effet de la température de fonctionnement
 - 2.11.2 Influence de l'atmosphère
 - 2.11.3 Effet de la fréquence de chauffage/refroidissement
 - 2.11.4 Influence de la tension de fonctionnement
 - 2.11.5 Effet de la densité de courant
 - 2.11.6 Impact de la méthode d'installation
 - 2.11.7 Impact de la qualité et de la pureté des composants
 - 2.11.8 Effet du traitement de protection du revêtement
- 2.12 CTIA GROUP LTD Élément chauffant MoSi₂ Fiche de données de sécurité

Chapitre 3 Structure et conception des éléments chauffants en MoSi₂

- 3.1 Structures communes des éléments chauffants en MoSi₂
 - 3.1.1 Élément chauffant MoSi₂ en forme de U
 - 3.1.2 Élément chauffant MoSi₂ de type W
 - 3.1.3 Élément chauffant en spirale MoSi₂
 - 3.1.4 Élément chauffant MoSi₂ de type tige droite
 - 3.1.5 Comparaison des conceptions structurelles en U, en W et droites
- 3.2 Conception dimensionnelle de l'élément chauffant MoSi₂ (les plus courants sont Φ 6/12 et Φ 9/18)
- 3.3 Conception optimale du champ thermique et de la structure de l'extrémité froide

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

- 3.4 Conception du système de connexion et de support électrique
- 3.5 Structure du terminal et méthode de connexion
- 3.6 Points clés de la conception de la personnalisation des produits

Chapitre 4 Procédé de fabrication de l'élément chauffant en MoSi₂

- 4.1 Principes de sélection et de dosage des matières premières
- 4.2 Métallurgie des poudres et procédé de pressage isostatique
- 4.3 Technologie de frittage et de post-traitement à haute température
- 4.4 Technologie de couche de protection de surface
- 4.5 Technologie de soudage et de traitement final

Chapitre 5 Test de performance de l'élément chauffant MoSi₂

- 5.1 Test de relation entre résistivité et température
- 5.2 Test sur la relation entre la durée de vie à haute température et la performance aux chocs thermiques
- 5.3 Test de stabilité en milieu oxydatif
- 5.4 Test de dureté de l'élément chauffant
- 5.5 Test sur la relation entre la résistance à l'oxydation et la température
- 5.6 Relation entre la rugosité de la surface de la tige et la résistivité
- 5.7 Effet de l'uniformité du revêtement des tiges sur la durée de vie
- 5.8 Relation entre la durée de vie et le couplage des contraintes
- 5.9 Mécanismes de fissuration, de flexion et d'ablation terminale
- 5.10 Analyse de la microstructure et étude des modes de défaillance

Chapitre 6 Installation des éléments chauffants MoSi₂

- 6.1 Préparations avant l'installation
- 6.2 Étapes d'installation détaillées
- 6.3 Notes d'installation
- 6.4 Spécifications de fonctionnement de sécurité
- 6.5 Guide des pannes courantes et de maintenance
 - 6.5.1 Causes et solutions en cas de rupture d'un élément chauffant
 - 6.5.2 Causes du décollement de la couche d'oxyde et traitement de régénération
 - 6.5.3 Méthodes d'entretien quotidien des éléments chauffants
 - 6.5.4 Technologie de remplacement et de recyclage des éléments chauffants
- 6.6 Méthodes d'installation typiques dans les fours industriels

Chapitre 7 Normes d'essai et certification des éléments chauffants en MoSi₂

- 7.1 Méthode d'essai des performances de l'élément chauffant
- 7.2 Analyse des normes ISO, ASTM et autres
- 7.3 Test d'adaptabilité environnementale
- 7.4 Modes de défaillance et méthodes de prédiction de la durée de vie
- 7.5 Exigences en matière de sécurité et de code électrique

Chapitre 8 Application des éléments chauffants MoSi₂

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

- 8.1 Application des éléments chauffants en MoSi_2 dans l'industrie métallurgique
 - 8.1.1 Fusion des métaux et traitement thermique
 - 8.1.2 Procédé de frittage à haute température
 - 8.1.3 Équipement de traitement thermique
- 8.2 Application des éléments chauffants MoSi_2 dans l'industrie céramique
 - 8.2.1 Cuisson et émaillage de la céramique
 - 8.2.2 Préparation de matériaux céramiques spéciaux
- 8.3 Application des éléments chauffants MoSi_2 dans l'industrie photovoltaïque
 - 8.3.1 Procédé à haute température pour la fabrication de plaquettes de silicium
 - 8.3.2 Équipement de production de cellules solaires
- 8.4 Application des éléments chauffants MoSi_2 dans l'industrie des semi-conducteurs
 - 8.4.1 Processus de recuit et de diffusion des plaquettes
 - 8.4.2 Croissance épitaxiale des semi-conducteurs
 - 8.4.3 Équipement de gravure à haute température
 - 8.4.4 Équipement de revêtement sous vide
- 8.5 Application des éléments chauffants MoSi_2 dans l'industrie de fabrication du verre
 - 8.5.1 Fusion du verre
 - 8.5.2 Traitement du verre
- 8.6 Application des éléments chauffants MoSi_2 à la préparation de nouveaux matériaux énergétiques
 - 8.6.1 Frittage des matériaux des batteries au lithium
 - 8.6.2 Énergie hydrogène et piles à combustible
- 8.7 Application des éléments chauffants MoSi_2 à la protection de l'environnement et à la catalyse
 - 8.7.1 Traitement des gaz résiduels
 - 8.7.2 Régénération du catalyseur
 - 8.7.3 Utilisation des ressources en déchets solides
- 8.8 Application des éléments chauffants MoSi_2 dans d'autres domaines
 - 8.8.1 Essais de matériaux aérospatiaux
 - 8.8.2 Équipements auxiliaires de l'industrie nucléaire
 - 8.8.3 Chimie de synthèse à haute température
 - 8.8.4 Transformateur à tige MoSi_2

Chapitre 9 Comparaison des éléments chauffants en MoSi_2 avec d'autres matériaux chauffants

- 9.1 Comparaison avec les éléments chauffants en tungstène
- 9.2 Comparaison avec les composants en carbure de silicium
- 9.3 Analyse du coût, de l'efficacité et de l'adéquation de l'application des éléments chauffants

Chapitre 10 Normes et spécifications pertinentes pour les éléments chauffants en MoSi_2

- 10.1 Norme nationale chinoise pour les éléments chauffants en MoSi_2
- 10.2 Normes internationales pour les éléments chauffants en MoSi_2
- 10.3 Normes relatives aux éléments chauffants MoSi_2 en Europe, en Amérique, au Japon, en Corée et dans d'autres pays

appendice:

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

Glossaire
Références



CTIA GROUP LTD Barre de silicium-molybdène

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 des éléments chauffants MoSi₂

Le disiliciure de molybdène (MoSi₂) est un composé intermétallique de formule chimique MoSi₂ . Il présente un point de fusion élevé (environ 2030 °C), une excellente résistance à l'oxydation à haute température et une bonne conductivité électrique et thermique. Il est largement utilisé dans le domaine du chauffage à haute température, car il présente les caractéristiques du métal et de la céramique. En tant que matériau chauffant résistif, les éléments chauffants en disiliciure de molybdène sont principalement utilisés dans les équipements de chauffage électrique sous atmosphère oxydante à haute température. À haute température, un film protecteur dense de dioxyde de silicium (SiO₂) se forme à sa surface, empêchant efficacement toute oxydation interne supplémentaire et prolongeant ainsi sa durée de vie. Les éléments chauffants en MoSi₂ offrent une stabilité de fonctionnement dans une plage de températures comprise entre 500 et 1850 °C et conviennent aux domaines de la recherche industrielle et scientifique tels que le frittage de céramique, la fusion du verre, le traitement thermique des métaux, le frittage à haute température et les fours de laboratoire à haute température. Comparé à d'autres matériaux chauffants tels que le carbure de silicium (SiC), le disiliciure de molybdène présente une température de fonctionnement plus élevée et une meilleure résistance à l'oxydation à haute température. Cependant, sa fragilité à basse température et ses limites de fluage à haute température limitent également certaines applications structurelles. Actuellement, les éléments chauffants en MoSi₂ se présentent sous différentes formes, notamment en U, en W, en L et sur mesure, ce qui permet de répondre aux besoins de différents fours industriels.

1.2 Historique du développement des éléments chauffants MoSi₂

L'étude du disiliciure de molybdène comme matériau haute température a débuté au début du XXe siècle, mais son application comme élément chauffant n'a débuté qu'au milieu du XXe siècle. En 1904, des scientifiques ont décrit pour la première fois la structure cristalline du MoSi₂ et confirmé qu'il s'agissait d'un cristal de type α tétragonal à point de fusion élevé et présentant les caractéristiques d'un composé intermétallique. Cependant, en raison des limitations de la technologie de préparation et de la pureté du matériau à l'époque, le MoSi₂ était principalement utilisé comme objet de recherche en laboratoire plutôt que comme matériau industriel. Dans les années 1930, grâce aux recherches approfondies sur les alliages et les matériaux céramiques haute température, le MoSi₂ a commencé à attirer l'attention en raison de son excellente résistance à l'oxydation et de sa conductivité à haute température. Les chercheurs ont découvert que le film protecteur de SiO₂ formé à la surface du MoSi₂ dans une atmosphère oxydante à haute température pouvait améliorer considérablement sa durabilité, ce qui a posé les bases théoriques du développement ultérieur des éléments chauffants.

En 1947, la société suédoise Kanthal a pris l'initiative de produire la première barre chauffante industrielle en disiliciure de molybdène , marquant ainsi l'entrée officielle des éléments chauffants en MoSi₂ dans le domaine des applications commerciales. Ces premières barres chauffantes étaient principalement utilisées dans les fours industriels à haute température, avec une température de fonctionnement maximale d'environ 1 600 °C. Kanthal a considérablement amélioré la résistance

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

mécanique et la résistance à l'oxydation des composants en optimisant le procédé de frittage et la technologie de dopage du MoSi_2 . Dans les années 1950 et 1960, avec l'émergence de technologies de préparation avancées telles que le frittage sous vide et la projection plasma, l'efficacité de production et les performances des éléments chauffants en MoSi_2 ont encore été améliorées. La forme de l'élément a évolué, passant d'une simple barre droite à des formes en U et en L pour répondre aux besoins des différents types de fours. De plus, les chercheurs ont amélioré la fragilité du MoSi_2 à basse température et les propriétés de fluage à haute température en dopant des éléments de terres rares ou d'autres métaux (tels que W et Nb), élargissant encore son domaine d'application. Dans les années 1980, la Chine a commencé à produire industriellement des éléments chauffants en disiliciure de molybdène. Au début, elle s'appuyait principalement sur des technologies importées, mais a progressivement développé des capacités de recherche et développement indépendantes. Durant cette période, la température maximale de fonctionnement des éléments chauffants en MoSi_2 a été portée à 1800 °C, et ils sont largement utilisés dans des industries telles que la céramique, le verre et les matériaux réfractaires. À cette époque, la société suédoise Kanthal a lancé l'élément chauffant Kanthal Super 1900, dont la température maximale de fonctionnement est de 1850 °C et qui est devenu une référence dans le secteur. Le succès de ce produit est dû à l'utilisation de matières premières de haute pureté et à l'amélioration des techniques de soudage à froid et à chaud, qui améliorent considérablement la stabilité de l'élément dans les cycles à haute et basse température.

Depuis les années 1990, la recherche et le développement des éléments chauffants en MoSi_2 se sont orientés vers l'optimisation des performances et l'élargissement des applications. De nouveaux procédés de préparation, tels que le frittage par pressage à chaud, le frittage par réaction et la synthèse auto-propagée à haute température (SHS), ont considérablement amélioré la densité et les propriétés mécaniques du matériau. Parallèlement, le développement de la technologie de revêtement MoSi_2 a permis son utilisation comme revêtement protecteur haute température dans le secteur aérospatial, notamment pour les aubes de turbines à gaz et les composants de moteurs à réaction. De plus, le développement de poudres nanométriques de MoSi_2 a permis la préparation de matériaux composites hautes performances, résolvant en partie le problème de sa fragilité à basse température. En termes de marché mondial, la valeur du marché des éléments chauffants MoSi_2 était d'environ 103 millions de dollars américains en 2016 et devrait atteindre 135 millions de dollars américains en 2022, avec un taux de croissance annuel composé de 4,7 %, reflétant sa demande continue dans le domaine industriel à haute température. Bien que les éléments chauffants en MoSi_2 soient performants dans les domaines à haute température, leur développement reste complexe. Leur fragilité à basse température et leurs propriétés de fluage insuffisantes à haute température limitent leur application comme matériaux de structure, tandis que leurs coûts de production élevés nuisent également à leur compétitivité sur le marché d'entrée de gamme. À l'avenir, les recherches pourraient se concentrer sur le développement de matériaux composites, la modification du dopage et de nouveaux procédés de préparation afin d'améliorer encore les performances et de réduire les coûts.

1.3 Statut d'application des éléments chauffants en disiliciure de molybdène

En disiliciure de molybdène (MoSi_2) jouent un rôle important dans l'industrie mondiale des hautes températures grâce à leur excellente résistance à l'oxydation, à leur température de fonctionnement

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

pouvant atteindre 1850 °C et à la stabilité de leurs propriétés électriques. Cet élément est largement utilisé dans les fours électriques haute température pour la production industrielle, la recherche scientifique et le traitement de matériaux spéciaux. Son principal avantage réside dans sa stabilité de fonctionnement prolongée en atmosphère oxydante, et le film protecteur dense de dioxyde de silicium (SiO_2) formé à sa surface prévient efficacement l'oxydation interne, prolongeant ainsi considérablement sa durée de vie. Ces dernières années, les progrès de la science des matériaux et des procédés de fabrication ont permis d'améliorer les performances des éléments chauffants en MoSi_2 . Par exemple, grâce à la modification du dopage et à une technologie de frittage avancée, la fragilité à basse température et le fluage à haute température de l'élément ont été améliorés, lui permettant de s'adapter à des environnements de travail plus exigeants.

Sur le marché mondial, la demande d' éléments chauffants en MoSi_2 continue de croître, notamment dans les secteurs de la céramique, du verre et des semi-conducteurs. L'entreprise suédoise Kanthal domine le marché avec sa gamme de produits Kanthal Super (comme le Kanthal Super 1900), réputée pour ses excellentes performances à haute température et sa fiabilité. Des entreprises chinoises, japonaises et américaines développent et produisent activement des éléments chauffants en MoSi_2 , la Chine bénéficiant d'avantages considérables en termes de maîtrise des coûts et de production à grande échelle. En termes de procédé de fabrication, des technologies telles que le frittage par pressage à chaud , le frittage par réaction et la synthèse auto-propagée à haute température (SHS) ont amélioré la densité et les propriétés mécaniques du matériau. La forme de l'élément a également évolué, passant d'une simple tige droite à des formes en U, en W, en L et sur mesure pour répondre aux besoins des différents modèles de fours. De plus, le développement de poudres MoSi_2 à l'échelle nanométrique a ouvert de nouveaux domaines d'application pour les matériaux composites et les revêtements hautes performances, tels que les revêtements de protection haute température dans les industries aérospatiale et énergétique.

Bien que les éléments chauffants en MoSi_2 offrent de bonnes performances dans les domaines à haute température, ils restent confrontés à certains défis. Leur fragilité à basse température limite leur potentiel dans certaines applications structurales, tandis que leurs coûts de production élevés les exposent à la concurrence de matériaux alternatifs tels que le carbure de silicium (SiC) sur le marché d'entrée de gamme. Les recherches actuelles portent sur l'amélioration des propriétés mécaniques par dopage de terres rares ou de métaux (tels que W, Nb), et le développement de nouveaux matériaux composites pour améliorer la résistance aux chocs thermiques et la durabilité. Avec l'essor des fours intelligents à haute température, les exigences en matière de contrôle précis de la température et de longévité des éléments chauffants en MoSi_2 ont été encore renforcées, ce qui a favorisé le développement de technologies de contrôle associées et l'optimisation des matériaux. À l'avenir, face à la demande mondiale croissante de méthodes de production efficaces, économes en énergie et respectueuses de l'environnement, les éléments chauffants en MoSi_2 devraient être utilisés dans des domaines plus émergents.

1.4 Secteurs d'application des éléments chauffants MoSi_2

En disiliciure de molybdène sont largement utilisés dans de nombreuses industries en raison de leur stabilité à haute température, de leur résistance à l'oxydation et de leurs excellentes propriétés électriques. Voici leurs principaux domaines d'application : dans l'industrie céramique, les éléments chauffants en

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

MoSi₂ sont des composants clés des procédés de frittage et de traitement à haute température pour la production de céramiques structurales, fonctionnelles et réfractaires. Leur température de fonctionnement maximale de 1 850 °C répond aux exigences de frittage des céramiques hautes performances telles que l'alumine, la zircone et le nitrure de silicium, garantissant ainsi la qualité du produit et la stabilité du procédé. Dans l'industrie verrière, les éléments chauffants en MoSi₂ sont largement utilisés dans les fours à haute température et les fours de recuit pour la production de verre optique, de verre plat et de verre spécial. Leur résistance à l'oxydation et leur longue durée de vie leur permettent de fonctionner en continu dans une atmosphère oxydante à haute température, améliorant ainsi considérablement l'efficacité de la production.

Dans le domaine du traitement thermique des métaux, les éléments chauffants en MoSi₂ sont utilisés dans les procédés de recuit, de trempe et de brasage à haute température, notamment pour le traitement de l'acier inoxydable, des alliages de titane et des alliages haute température. Leur chauffage rapide et leur contrôle précis de la température améliorent la qualité des produits et l'efficacité des procédés. Dans l'industrie des semi-conducteurs, les fours de diffusion et d'oxydation à haute température utilisent souvent des éléments chauffants en MoSi₂ pour le traitement thermique des plaquettes de silicium et le dépôt de couches minces. Sa grande pureté et sa stabilité répondent aux exigences strictes de l'industrie des semi-conducteurs en matière d'environnement propre et de contrôle précis de la température.

Dans le domaine aérospace, le MoSi₂ est utilisé non seulement comme élément chauffant, mais aussi comme revêtement protecteur pour les aubes de turbines à gaz et les composants de moteurs à réaction. Sa résistance à l'oxydation et à la corrosion à haute température lui confère une excellente performance dans des environnements extrêmes. Dans le domaine de la recherche scientifique, les éléments chauffants MoSi₂ sont largement utilisés dans les fours expérimentaux à haute température des laboratoires de science des matériaux, de physique et de chimie, tels que les analyseurs thermogravimétriques, les calorimètres à balayage différentiel et les équipements de synthèse à haute température, pour soutenir le développement de nouveaux matériaux. Dans les industries réfractaires et métallurgiques, les éléments chauffants MoSi₂ sont utilisés pour le traitement à haute température dans les processus de frittage réfractaire et métallurgique, tels que la production de métaux et d'alliages de haute pureté, et leur rendement élevé et leur longue durée de vie réduisent les coûts de production.

Dans le domaine de l'énergie et de la protection de l'environnement, les éléments chauffants MoSi₂ sont utilisés dans les incinérateurs à haute température, les équipements de test de piles à combustible à oxyde solide (SOFC) et les systèmes de traitement thermique des déchets, contribuant à une production propre et à une utilisation efficace de l'énergie. Les éléments chauffants en MoSi₂ bénéficient des avancées technologiques et des propriétés de leurs matériaux. Les exigences de performance varient selon les industries. Par exemple, les industries de la céramique et du verre accordent une plus grande importance à la stabilité et à la durée de vie à haute température, tandis que l'industrie des semi-conducteurs privilégie la pureté et la précision du contrôle de température. À l'avenir, face à des exigences accrues en matière de performance des équipements haute température, les éléments chauffants en MoSi₂ devraient permettre des avancées majeures dans de nombreux domaines grâce à l'optimisation des matériaux et à l'innovation des procédés.

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

CTIA GROUP LTD
MoSi₂ Heating Element Introduction

1. Overview of MoSi₂ Heating Element

Molybdenum disilicide (MoSi₂) heating elements are high-performance ceramic electric heating materials widely used in industrial furnace applications. In high-temperature oxidizing atmospheres, MoSi₂ forms a dense silica (SiO₂) protective layer on its surface, which effectively prevents further oxidation. It exhibits excellent oxidation resistance and thermal stability, allowing stable operation under high temperatures for extended periods.

2. Features of MoSi₂ Heating Element

Low thermal expansion coefficient: Well-matched with common ceramic substrates, minimizing the risk of cracking caused by thermal stress.

Excellent oxidation resistance: Forms a dense SiO₂ protective film on the surface, effectively preventing material degradation from oxidation.

Extremely high working temperature: Capable of continuous operation up to 1700°C, and a maximum usage temperature of 1800°C in oxidizing atmospheres.

Good high-temperature electrical resistance characteristics: MoSi₂ exhibits relatively stable resistivity at high temperatures, with only a gradual increase in resistivity at elevated temperatures.

3. Specifications of MoSi₂ Heating Element

Model (d1/d2)	Hot End Diameter (d1)	Cold End Diameter (d2)	Hot Zone Length (Le)	Cold Zone Length (Lu)	Common Types
φ3/6	3 mm	6 mm	100–300 mm	150–250 mm	Straight / U-type
φ4/9	4 mm	9 mm	100–500 mm	200–300 mm	Straight / U-type
φ6/12	6 mm	12 mm	100–600 mm	200–350 mm	Straight / U-type / W-type
φ9/18	9 mm	18 mm	150–800 mm	250–400 mm	Straight / U-type / W-type
φ12/24	12 mm	24 mm	200–1000 mm	300–500 mm	Straight / U-type / W-type

4. Typical Applications of MoSi₂ Heating Element

High-temperature sintering furnaces in the ceramics and powder metallurgy industries

Heat treatment equipment for steel and non-ferrous metals

High-temperature laboratory furnaces

Diffusion, annealing, and oxidation processes in the semiconductor and photovoltaic industries

5. Purchasing Information

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

Website: www.molybdenum.com.cn

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

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

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

Chapitre 2 Caractéristiques des éléments chauffants en MoSi₂ et leurs facteurs d'influence

2.1 Propriétés physiques des éléments chauffants en MoSi₂

Le disiliciure de molybdène (MoSi₂) est un composé intermétallique combinant les caractéristiques des métaux et des céramiques. Ses propriétés physiques lui confèrent d'excellentes performances comme élément chauffant haute température. Sa structure cristalline, de type α tétragonal (type C11b), avec un groupe spatial de I4/mmm, présente une symétrie et une stabilité élevées. Son point de fusion, d'environ 2030 °C, lui permet de conserver son intégrité structurelle à des températures extrêmement élevées. Sa masse volumique relativement faible de 6,24 g/cm³ contribue à réduire le poids de l'élément chauffant et convient aux conceptions de formes complexes. Son coefficient de dilatation thermique d'environ $8,1 \times 10^{-6} \text{ K}^{-1}$ (de la température ambiante à 1000 °C), s'adapte parfaitement aux matériaux de matrice céramique courants (tels que l'alumine et la zircone), réduisant ainsi le risque de fissuration due aux contraintes thermiques.

Le MoSi₂ a une conductivité thermique d'environ 45 W/(m·K) à température ambiante et diminue progressivement avec l'augmentation de la température. Il peut néanmoins transférer efficacement la chaleur à haute température pour assurer un chauffage uniforme de l'élément chauffant. Il présente une dureté élevée, avec une dureté Vickers d'environ 1 200 HV, et une bonne résistance à l'usure. Cependant, sa fragilité à basse température (ténacité à la rupture d'environ 2 à 3 MPa·m^{1/2}) le rend sensible aux chocs mécaniques. La résistance à l'oxydation du MoSi₂ est particulièrement remarquable en atmosphère oxydante à haute température. Un film protecteur dense de SiO₂ se forme à la surface au-dessus de 800 °C, empêchant efficacement la diffusion d'oxygène et protégeant la structure interne de l'érosion par oxydation. Cette caractéristique lui permet de fonctionner longtemps en atmosphère oxydante, avec une température de fonctionnement maximale allant jusqu'à 1 850 °C.

Le MoSi₂ est influencé par de nombreux facteurs. La pureté des matières premières est essentielle. Un MoSi₂ de haute pureté peut réduire l'affaiblissement des joints de grains dû aux impuretés et améliorer les propriétés mécaniques et la résistance à l'oxydation. Les procédés de préparation, tels que le frittage par pressage à chaud ou le frittage par réaction, influencent la densité du matériau. Plus la densité est élevée, plus la résistance à l'oxydation et la conductivité thermique sont élevées. Un dopage (par exemple, ajout d'Al, de W ou de terres rares) peut améliorer la fragilité à basse température et les propriétés de fluage à haute température, mais peut légèrement réduire la résistance à l'oxydation. De plus, l'environnement de travail (type d'atmosphère et fréquence des cycles de température) a également un effet significatif sur la stabilité des propriétés physiques. Par exemple, en atmosphère réductrice, le film protecteur de SiO₂ peut se rompre, entraînant une dégradation accélérée du matériau.

2.2 Résistivité des éléments chauffants en MoSi₂

La résistivité des éléments chauffants en MoSi₂ est le paramètre de performance clé du MoSi₂ en tant que matériau de chauffage électrique, ce qui affecte directement l'efficacité de chauffage et la précision du contrôle de la température. La résistivité du MoSi₂ présente des caractéristiques non linéaires avec les variations de température. À température ambiante, sa résistivité est d'environ $2,0 \times 10^{-5} \Omega \cdot \text{cm}$. À mesure

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

que la température augmente, elle augmente progressivement pour atteindre environ $4,0 \times 10^{-5}$ à environ $1\,000\text{ }^{\circ}\text{C}$. $\Omega\cdot\text{cm}$. Ce coefficient de température positif permet à l'élément chauffant en MoSi₂ d'ajuster automatiquement sa puissance à haute température, d'éviter la surchauffe et d'améliorer la sécurité. Au-delà de $1\,000\text{ }^{\circ}\text{C}$, la résistivité augmente lentement puis se stabilise, ce qui permet un contrôle précis de la température dans la plage de températures élevées.

Le MoSi₂ est influencé par la composition du matériau, sa microstructure et son environnement extérieur. La pureté et la teneur en impuretés des matières premières ont un impact significatif sur la résistivité. Par exemple, des impuretés telles que le fer et l'aluminium augmentent la résistivité et réduisent la stabilité, tandis que le MoSi₂ de haute pureté présente des propriétés électriques plus constantes. La granulométrie et les caractéristiques des joints de grains sont également cruciales. Des grains plus petits s'accompagnent généralement d'une résistance aux joints de grains plus élevée, ce qui se traduit par une résistivité légèrement supérieure, mais une meilleure résistance mécanique. L'effet du procédé de préparation sur la résistivité est également significatif. Le MoSi₂ préparé par frittage à chaud présente une densité plus élevée, moins de défauts aux joints de grains et une résistivité plus faible et stable, tandis que les échantillons frittés par réaction peuvent présenter une résistivité plus élevée en raison d'une porosité plus importante.

La modification du dopage est un moyen important d'ajuster la résistivité du MoSi₂. L'ajout de tungstène (W) ou de niobium (Nb) peut réduire la résistivité et améliorer la conductivité à haute température, mais peut compromettre certaines propriétés antioxydantes. Le dopage aux terres rares (comme Y₂O₃) stabilise l'évolution de la résistivité avec la température en améliorant la structure des joints de grains. L'influence de l'environnement de travail sur la résistivité ne peut être ignorée. En atmosphère oxydante, la formation d'un film protecteur de SiO₂ a peu d'effet sur la résistivité, mais en environnement réducteur ou sous vide, la volatilisation du silicium peut se produire en surface, entraînant une augmentation progressive de la résistivité et affectant la stabilité à long terme.

MoSi₂ doivent être optimisés en fonction des applications spécifiques. Par exemple, les fours de frittage de céramique nécessitent une résistivité stable pour assurer un chauffage uniforme, tandis que les fours de traitement thermique des semi-conducteurs nécessitent une résistivité plus faible pour une montée en température rapide. En pratique, l'adaptation de la résistivité de l'extrémité froide (généralement dopée avec un matériau plus conducteur) et de l'extrémité chaude peut améliorer le rendement global et réduire les pertes d'énergie.

2.3 Caractéristiques de résistance à haute température des éléments chauffants en MoSi₂

En disiliciure de molybdène (MoSi₂) sont l'une des propriétés essentielles des matériaux de chauffage électrique, affectant directement leur efficacité de chauffage, la précision du contrôle de température et leur durée de vie. Dans la plage de températures élevées, la résistivité du MoSi₂ présente une relative stabilité. Comparée à l'augmentation rapide de la température ambiante à $1\,000\text{ }^{\circ}\text{C}$, l'augmentation de la résistivité dans la zone à haute température ralentit considérablement. Par exemple, à température ambiante, la résistivité du MoSi₂ est d'environ $2,0 \times 10^{-5}\text{ }\Omega\cdot\text{cm}$, et augmente à environ $4,0 \times 10^{-5}$ à $1\,000\text{ }^{\circ}\text{C}$ $\Omega\cdot\text{cm}$, tandis qu'à $1\,500\text{ }^{\circ}\text{C}$, elle est d'environ $4,5 \times 10^{-5}\text{ }\Omega\cdot\text{cm}$, puis varie moins à mesure que

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

la température augmente. Ce coefficient de température positif (CTP) permet au MoSi₂ d'ajuster automatiquement sa puissance de sortie à haute température, d'éviter la surchauffe et d'améliorer la sécurité. Parallèlement, il offre des performances stables pour les applications nécessitant un contrôle précis de la température, telles que le frittage de céramique et le traitement thermique des semi-conducteurs. La stabilité des caractéristiques de résistance à haute température provient de la structure intermétallique du MoSi₂, dont le mécanisme conducteur repose principalement sur des liaisons métalliques. Même à haute température, la vibration accrue du réseau entraîne une diffusion électronique accrue, et la conductivité reste élevée. Cependant, un fonctionnement prolongé à haute température peut entraîner une légère dérive de la résistivité, principalement due aux changements de composition induits par la croissance du film protecteur de SiO₂ en surface ou la volatilisation de traces de Si, ainsi qu'à l'évolution microstructurale induite par les contraintes thermiques (comme la croissance des grains ou l'affaiblissement des joints de grains).

Les facteurs affectant les propriétés de résistance à haute température comprennent la pureté du matériau, la modification du dopage et l'environnement de travail. Le MoSi₂ haute pureté peut réduire l'instabilité de la résistance causée par les impuretés (comme le Fe et l'Al) et garantir des performances électriques constantes. Le dopage avec des éléments métalliques (comme le W et le Nb) peut réduire la résistivité et améliorer la conductivité à haute température, mais peut légèrement réduire la résistance à l'oxydation. Le dopage avec des terres rares (comme le Y₂O₃) stabilise l'évolution de la résistivité avec la température en optimisant la structure des joints de grains. En atmosphère oxydante, le film protecteur de SiO₂ a peu d'effet sur la résistivité, mais en environnement réducteur ou sous vide, la volatilisation du Si entraîne une augmentation progressive de la résistivité et accélère le vieillissement des composants. Le procédé de préparation a également une influence importante sur les caractéristiques de résistance. Le MoSi₂ préparé par frittage à chaud présente une densité élevée, moins de défauts aux joints de grains et des caractéristiques de résistance plus stables. En revanche, les échantillons frittés par réaction présentant une porosité plus élevée peuvent subir une dégradation des performances due à des irrégularités locales du courant. Dans les applications pratiques, l'extrémité froide est généralement dopée avec des matériaux hautement conducteurs afin de réduire la résistance, et l'optimisation de l'adaptation de résistance entre l'extrémité froide et l'extrémité chaude peut améliorer l'efficacité énergétique. Un entretien régulier et l'évitement des cycles de température extrêmes contribuent à maintenir la stabilité à long terme des caractéristiques des résistances haute température.

2.4 Résistance à l'oxydation à haute température des éléments chauffants en MoSi₂

La résistance à l'oxydation à haute température des éléments chauffants en disiliciure de molybdène est essentielle à un fonctionnement stable à long terme en atmosphère oxydante, ce qui en fait le matériau privilégié pour les fours électriques à haute température. Au-dessus de 800 °C, un film protecteur dense de dioxyde de silicium (SiO₂) se forme rapidement à la surface du MoSi₂. Ce film présente un faible coefficient de diffusion de l'oxygène et une bonne capacité d'auto-réparation, empêchant efficacement la pénétration de l'oxygène à l'intérieur et protégeant le substrat de la corrosion par oxydation. Sa réaction d'oxydation est la suivante : $2\text{MoSi}_2 + 7\text{O}_2 \rightarrow 2\text{MoO}_3 + 4\text{SiO}_2$, où MoO₃ se volatilise à haute température et le SiO₂ restant forme une couche protectrice continue. Dans la plage de températures de 1 200 à 1 850 °C, ce film protecteur permet au MoSi₂ de fonctionner de manière stable et durable en atmosphère

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

oxydante, ce qui le rend adapté aux procédés à haute température tels que le frittage de céramique et la fusion du verre. Cependant, dans la plage de températures de 400 à 700 °C, le MoSi₂ est sujet à la corrosion, s'oxydant pour former un mélange non protecteur de MoO₃ et de SiO₂, entraînant une pulvérisation du matériau, notamment lors de cycles de température fréquents. Pour éviter ce problème, cette plage de températures est généralement franchie rapidement dans les applications pratiques. Le MoSi₂ présente une faible résistance à l'oxydation en atmosphère réductrice (comme H₂) ou sous vide, car le film protecteur de SiO₂ ne peut se former ou est détruit, ce qui entraîne la volatilisation du Si et la dégradation du matériau. Il n'est donc pas adapté à ces environnements. Les facteurs affectant la résistance à l'oxydation à haute température comprennent la pureté du matériau, la microstructure et la modification du dopage. Le MoSi₂ de haute pureté peut réduire l'oxydation des joints de grains causée par les impuretés et améliorer la densité des films de SiO₂. Les microstructures denses (telles que celles obtenues par pressage à chaud et frittage) peuvent réduire les voies de diffusion de l'oxygène et améliorer la résistance à l'oxydation. Le dopage avec des terres rares (comme Y₂O₃) ou des oxydes peut améliorer l'adhérence et la capacité d'auto-cicatrisation des films de SiO₂, tandis que certains dopages métalliques (comme W) peuvent réduire la résistance à l'oxydation en modifiant la cinétique d'oxydation. L'humidité de l'environnement de travail peut également affecter la résistance à l'oxydation. Dans un environnement très humide, les films de SiO₂ peuvent subir des réactions d'hydratation, réduisant ainsi leur effet protecteur. Afin d'améliorer la résistance à l'oxydation à haute température, les éléments chauffants modernes en MoSi₂ utilisent souvent des revêtements de surface (tels que les revêtements Al₂O₃ ou ZrO₂) pour renforcer l'effet protecteur, ou pour améliorer la densité du matériau en optimisant le frittage. Dans les applications pratiques, le maintien d'une atmosphère oxydante stable et l'évitement de cycles fréquents à basse température sont essentiels pour prolonger la durée de vie de l'antioxydant.

2.5 Conductivité thermique et diffusivité thermique des éléments chauffants en MoSi₂

La conductivité thermique et la diffusivité thermique des éléments chauffants en MoSi₂ sont des indicateurs importants de leur conductivité thermique, qui influencent directement la vitesse de chauffe, l'homogénéité de la température et l'efficacité énergétique. La conductivité thermique du MoSi₂ est d'environ 45 W/(m·K) à température ambiante, puis diminue progressivement avec la température jusqu'à environ 25 W/(m·K) à 1 000 °C, puis jusqu'à environ 15 W/(m·K) à 1 500 °C. Bien que la conductivité thermique diminue à haute température, le MoSi₂ assure un transfert thermique efficace et une répartition uniforme de la température dans le four, ce qui le rend adapté à des applications telles que le frittage de céramique et la fusion du verre qui nécessitent une grande homogénéité thermique.

La variation de conductivité thermique est principalement due à la vibration du réseau et au mécanisme de conductivité thermique électronique du MoSi₂. À basse température, la conductivité thermique électronique est dominante, tandis qu'à haute température, la diffusion accrue des phonons entraîne une diminution de la conductivité thermique. La diffusivité thermique du MoSi₂ ($\alpha = k / (\rho \cdot c)$), où k est la conductivité thermique, ρ la masse volumique et c la capacité thermique massique) varie également avec la température.

À température ambiante, la capacité thermique spécifique du MoSi₂ est d'environ 0,45 J/(g·K), la densité est de 6,24 g/cm³ et le coefficient de diffusion thermique est d'environ $1,6 \times 10^{-5}$ m²/s ; à haute température,

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

la capacité thermique spécifique augmente légèrement et le coefficient de diffusion thermique diminue en raison de la diminution de la conductivité thermique. Les facteurs affectant la conductivité thermique et le coefficient de diffusion thermique comprennent la pureté du matériau, la microstructure et la modification du dopage. Les impuretés (telles que Fe et C) augmentent la diffusion des phonons et réduisent la conductivité thermique, tandis que le MoSi₂ de haute pureté a une conductivité thermique plus élevée. Le MoSi₂ à haute densité (comme les échantillons frittés pressés à chaud) a une conductivité thermique plus élevée, tandis que les échantillons à forte porosité ont une conductivité thermique plus faible en raison de la diffusion de la chaleur par les pores.

L'effet de la modification du dopage est complexe. L'ajout de W peut légèrement augmenter la conductivité thermique, tandis que le dopage aux oxydes de terres rares peut la réduire en raison de la diffusion aux joints de grains. Dans les applications pratiques, la conductivité et la diffusivité thermiques doivent être optimisées en fonction du type de four et du procédé. Par exemple, les fours de traitement thermique des semi-conducteurs nécessitent une conductivité thermique plus élevée pour un chauffage rapide, tandis que les grands fours de frittage de céramique accordent plus d'importance à l'uniformité thermique. L'optimisation du processus de préparation (par exemple, l'augmentation de la densité) et la conception rationnelle de la forme des composants (par exemple, l'augmentation de la surface de l'extrémité chaude) peuvent améliorer la conductivité thermique et réduire les pertes d'énergie.

2.6 Stabilité aux chocs thermiques des éléments chauffants en MoSi₂

En disiliciure de molybdène (MoSi₂) se caractérisent par leur capacité à résister aux fissures ou aux fractures induites par les contraintes thermiques lors de changements rapides de température. C'est un indicateur important pour évaluer leur fiabilité dans des environnements de cycles à haute température. La stabilité aux chocs thermiques du MoSi₂ est étroitement liée à son faible coefficient de dilatation thermique et à sa conductivité thermique modérée. Ces caractéristiques permettent au MoSi₂ de mieux disperser les contraintes thermiques lors de chauffages et de refroidissements rapides, et de réduire la concentration de contraintes internes causée par les gradients de température. Cependant, la fragilité à basse température du MoSi₂ peut néanmoins provoquer des microfissures ou des fractures dans des conditions de chocs thermiques sévères, en particulier lors de cycles fréquents à haute et basse température. La performance de la stabilité aux chocs thermiques affecte directement la durée de vie et la fiabilité des éléments chauffants en MoSi₂ dans des applications telles que les fours de frittage de céramique et les fours de fusion de verre qui nécessitent un chauffage ou un refroidissement rapide. Les principaux facteurs affectant la stabilité aux chocs thermiques sont la pureté du matériau, la microstructure et le procédé de préparation. Le MoSi₂ de haute pureté peut réduire l'affaiblissement des joints de grains causé par les impuretés (telles que Fe et Al), diminuant ainsi le risque de propagation de fissures induites par les chocs thermiques. En termes de microstructure, le MoSi₂ dense (par exemple, préparé par pressage à chaud et frittage) présente moins de pores et de défauts et peut disperser efficacement les contraintes thermiques, tandis que les échantillons à porosité plus élevée sont sujets à une concentration locale de contraintes sous choc thermique, entraînant des fissures. La modification du dopage a également un effet significatif sur la stabilité aux chocs thermiques. Par exemple, l'ajout d'oxydes de terres rares (tels que Y₂O₃) ou d'oxyde d'aluminium (Al₂O₃) peut augmenter la résistance des joints de grains et améliorer la résistance aux chocs thermiques, tandis que certains dopages métalliques (tels que W) peuvent légèrement réduire la stabilité aux chocs thermiques en raison de

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

modifications des caractéristiques de dilatation thermique. La vitesse de variation de température et la fréquence des cycles dans l'environnement de travail sont des facteurs externes clés. Des cycles de chocs thermiques rapides (comme une chute brutale de 1 500 °C à température ambiante) aggravent l'accumulation de contraintes thermiques et réduisent la durée de vie des composants. Dans les applications pratiques, l'optimisation de la stratégie de contrôle de la température dans le four (par exemple, une montée et une descente lentes en température) et la conception d'une forme de composant raisonnable (par exemple, en évitant les arêtes vives pour réduire la concentration des contraintes) peuvent améliorer considérablement la stabilité aux chocs thermiques. De plus, les revêtements de surface (par exemple, les revêtements SiC ou Al_2O_3) peuvent améliorer encore la résistance aux chocs thermiques du MoSi_2 et prolonger sa durée de vie.

2.7 Stabilité aux chocs thermiques des éléments chauffants en MoSi_2

La stabilité aux chocs thermiques des éléments chauffants en MoSi_2 se réfère à leur capacité à résister à la fissuration ou à la dégradation des performances sous des gradients de température extrêmes ou des chocs thermiques instantanés (tels qu'une exposition directe à l'air froid ou à un refroidissement liquide). Elle est étroitement liée à la stabilité aux chocs thermiques, mais elle met l'accent sur les variations de température instantanées et drastiques. La stabilité aux chocs thermiques du MoSi_2 bénéficie de son faible coefficient de dilatation thermique et de sa conductivité thermique modérée, qui permettent au matériau de mieux disperser les contraintes thermiques lors de variations de température instantanées. Cependant, en raison de sa faible ténacité à la rupture, le MoSi_2 peut subir une propagation de microfissures, voire une fracture macroscopique, sous des conditions de chocs thermiques sévères, notamment dans la plage de températures de « peste » de 400 à 700 °C, où le choc thermique peut aggraver l'oxydation et le poudrage, entraînant une défaillance du matériau. La stabilité aux chocs thermiques est essentielle pour l'application des éléments chauffants en MoSi_2 dans des fours à haute température à démarrage et arrêt rapides ou dans des environnements de chauffage non uniformes, comme dans les procédés de formage du verre ou de traitement thermique des métaux. Les facteurs affectant la stabilité des chocs thermiques comprennent la composition du matériau, la microstructure et l'environnement externe.

Le MoSi_2 , plus pur, peut réduire la concentration de contraintes causée par les impuretés aux joints de grains et améliorer la résistance aux chocs thermiques. Une microstructure dense (telle que celle obtenue par pressage à chaud ou frittage par réaction) peut réduire efficacement la propagation des fissures induites par les chocs thermiques, tandis que les échantillons à porosité plus élevée présentent une faible stabilité aux chocs thermiques en raison d'un plus grand nombre de défauts. La modification du dopage a un double effet sur la stabilité aux chocs thermiques. Par exemple, l'ajout de terres rares (comme La_2O_3) peut améliorer la liaison aux joints de grains et la résistance aux fissures, tandis que certains dopages métalliques peuvent réduire la stabilité en raison d'un décalage de dilatation thermique. L'intensité du choc thermique (comme l'injection d'air froid ou le refroidissement liquide) et le nombre de cycles dans l'environnement de travail peuvent affecter significativement les performances. Un choc thermique important peut provoquer la fissuration du film protecteur de SiO_2 en surface et réduire la résistance à l'oxydation. Dans les applications pratiques, l'optimisation de la conception des composants (par exemple, l'utilisation de structures en U ou en W pour augmenter la dispersion des contraintes thermiques) et le contrôle des conditions de choc thermique (par exemple, en évitant l'exposition directe aux milieux froids)

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

peuvent améliorer la stabilité aux chocs thermiques. De plus, les technologies de modification de surface (telles que le revêtement avec des revêtements céramiques à haute ténacité) peuvent améliorer la résistance aux chocs thermiques du MoSi₂ et réduire la propagation des fissures.

2.8 Performances en fatigue thermique des éléments chauffants en MoSi₂

La résistance à la fatigue thermique des éléments chauffants en MoSi₂ se réfère à leur capacité à résister à la dégradation de leurs performances (augmentation de la résistivité, diminution de la résistance mécanique ou dégradation du film protecteur de surface, par exemple) lors de cycles répétés haute-basse température. Elle constitue un indicateur clé pour évaluer leur fiabilité à long terme. La résistance à la fatigue thermique du MoSi₂ est influencée conjointement par son faible coefficient de dilatation thermique, sa conductivité thermique modérée et sa résistance à l'oxydation à haute température. En atmosphère oxydante, le film protecteur de SiO₂ formé à la surface du MoSi₂ peut rester stable pendant plusieurs cycles thermiques et ralentir la dégradation du matériau. Cependant, lors du processus de fatigue thermique, des contraintes thermiques et mécaniques répétées peuvent provoquer l'apparition et l'expansion de microfissures, en particulier dans le MoSi₂ présentant une fragilité importante à basse température, où la fatigue thermique peut provoquer une rupture du composant ou une dérive des performances électriques. De plus, dans la plage de températures critique de 400 à 700 °C, les cycles de fatigue thermique peuvent aggraver la pulvérisation par oxydation et accélérer la défaillance du matériau. La performance en fatigue thermique affecte directement la durée de vie des éléments chauffants en MoSi₂ dans des applications telles que le frittage de céramique et le traitement thermique des métaux, qui nécessitent des cycles thermiques fréquents. Les facteurs affectant la performance en fatigue thermique comprennent la pureté du matériau, la microstructure, la modification du dopage et l'environnement de travail.

Le MoSi₂ de haute pureté peut réduire l'affaiblissement des joints de grains dû aux impuretés et diminuer le risque de fissures de fatigue thermique. Les microstructures denses (telles que les échantillons frittés pressés à chaud) peuvent disperser efficacement les contraintes thermiques cycliques et améliorer la durée de vie en fatigue thermique, tandis que les échantillons à porosité plus élevée sont sujets aux défaillances dues à la concentration des contraintes. La modification du dopage a une influence importante sur les performances en fatigue thermique. Par exemple, l'ajout d'oxydes de terres rares (comme Y₂O₃) ou d'alumine peut améliorer la résistance des joints de grains et inhiber la propagation des fissures, tandis que certains dopages métalliques peuvent réduire les performances en fatigue thermique en raison d'un décalage de dilatation thermique. L'amplitude, la fréquence et le type d'atmosphère du cycle thermique ont un impact significatif sur les performances en fatigue thermique. Par exemple, dans un environnement réducteur ou sous vide, la rupture du film protecteur de SiO₂ entraînera la volatilisation du silicium et accélérera la dégradation par fatigue thermique. Dans les applications pratiques, l'optimisation des paramètres du cycle thermique (comme la réduction des vitesses de chauffage et de refroidissement), l'amélioration de la conception des composants (comme l'augmentation de la résistance de l'extrémité chaude) et le recours à des revêtements de surface (comme le SiC ou le ZrO₂) peuvent améliorer considérablement les performances en fatigue thermique. Une inspection et un entretien réguliers peuvent également prolonger efficacement la durée de vie des éléments chauffants en MoSi₂.

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

2.9 État de surface de l'élément chauffant en MoSi₂

En disiliciure de molybdène (MoSi₂) ont une influence importante sur leurs performances à haute température, leur durée de vie et leur fiabilité. Les caractéristiques de surface du MoSi₂ se reflètent principalement dans son film d'oxyde SiO₂ naturellement formé , sa microstructure de surface et la performance du revêtement protecteur appliqué. Dans une atmosphère oxydante à haute température, un film protecteur dense de SiO₂ se forme à la surface du MoSi₂ au-dessus de 800 ° C. Ce film est la clé de son excellente résistance à l'oxydation, empêchant efficacement la diffusion de l'oxygène vers l'intérieur et protégeant le substrat de la corrosion par oxydation. Cependant, l'état de surface n'est pas seulement affecté par le film d'oxyde, il est également étroitement lié aux défauts de surface (tels que les microfissures, les pores), à la qualité du revêtement et à l'évolution de la surface lors d'une utilisation à long terme. L'état de surface du MoSi₂ détermine directement sa stabilité aux cycles à haute température, aux chocs thermiques et à la fatigue thermique, en particulier dans les applications exigeantes telles que le frittage de céramique, la fusion du verre et le traitement thermique des semi-conducteurs.

La qualité de l'état de surface dépend de nombreux facteurs, notamment la pureté du matériau, le procédé de préparation et l'environnement de travail. Le MoSi₂ de haute pureté permet de réduire la fragilisation des joints de grains due aux impuretés de surface (telles que Fe et Al) et de générer un état plus uniforme et plus dense. Film de SiO₂ . Les procédés de préparation tels que le frittage par pressage à chaud ou le frittage par réaction ont un effet significatif sur la rugosité et la porosité de la surface. La surface du MoSi₂ préparée par frittage par pressage à chaud est plus lisse et présente moins de défauts, ce qui favorise la formation d'un film d'oxyde stable. En revanche, les échantillons frittés par réaction peuvent réduire l'effet protecteur en raison de la présence de pores en surface. Le type d'atmosphère, l'humidité et la fréquence des cycles de température de l'environnement de travail influencent également l'état de surface. Par exemple, un environnement très humide peut entraîner l'hydratation du film de SiO₂ et réduire son pouvoir protecteur, tandis que des cycles de température fréquents peuvent provoquer des fissures de surface ou un décollement du revêtement. Afin d'optimiser l'état de surface, les éléments chauffants modernes en MoSi₂ améliorent souvent la résistance à l'oxydation et la durabilité grâce à des modifications de surface (comme la technologie de revêtement) ou à l'optimisation des procédés (comme le polissage).

La stabilité à long terme de l'état de surface est cruciale pour les performances des éléments chauffants en MoSi₂ . Lors d'un fonctionnement prolongé à haute température, le film de SiO₂ en surface peut s'amincir en raison de la volatilisation du Si ou du MoO₃ , notamment en milieu réducteur ou sous vide, et la capacité de protection de la surface est considérablement réduite. De plus, l'apparition et la propagation de microfissures de surface peuvent être aggravées par des contraintes thermiques ou mécaniques, notamment en cas de choc thermique ou de fatigue thermique. Dans la pratique, l'inspection régulière de l'état de surface, l'optimisation des vitesses de chauffage et de refroidissement et l'utilisation de revêtements protecteurs sont des mesures efficaces pour maintenir les performances de surface des éléments chauffants en MoSi₂ . À l'avenir, avec le développement des technologies d'ingénierie de surface, l'optimisation de l'état de surface du MoSi₂ deviendra un axe important pour améliorer ses performances globales.

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

2.9.1 Types de revêtements protecteurs couramment utilisés

Afin d'améliorer la résistance à l'oxydation, la stabilité aux chocs thermiques et la tenue à la fatigue thermique des éléments chauffants en disiliciure de molybdène, la technologie de revêtement de surface est largement utilisée pour les éléments MoSi₂. Les revêtements protecteurs courants comprennent les revêtements d'oxyde, les revêtements de carbure et les revêtements composites, chacun ciblant des exigences de performance et des environnements d'application spécifiques. Les revêtements d'oxyde sont les plus courants, parmi lesquels les revêtements d'oxyde d'aluminium (Al₂O₃) et d'oxyde de zirconium (ZrO₂) sont privilégiés en raison de leur point de fusion élevé, de leur stabilité chimique et de leur faible coefficient de diffusion de l'oxygène. Les revêtements d'Al₂O₃ sont appliqués par projection plasma ou dépôt chimique en phase vapeur (CVD) pour former une couche protectrice dense à haute température, améliorant ainsi significativement la résistance à l'oxydation et aux chocs thermiques du MoSi₂, notamment dans les atmosphères oxydantes de 1 500 à 1 800 °C.

ZrO₂ sont souvent utilisés dans les applications exigeant une grande stabilité aux chocs thermiques, comme les composants aérospatiaux haute température, en raison de leurs excellentes propriétés de barrière thermique. Les revêtements en carbure sont principalement en carbure de silicium (SiC), car leurs coefficients de dilatation thermique correspondent bien à ceux du substrat MoSi₂, ce qui peut réduire les contraintes thermiques entre le revêtement et le substrat et limiter le risque d'écaillage. Les revêtements SiC sont appliqués par projection plasma ou frittage réactif, ce qui améliore non seulement la résistance à l'oxydation, mais aussi la résistance à l'usure de surface, les rendant ainsi adaptés aux environnements à forte usure tels que les fours de frittage céramique. Les revêtements composites ont fait l'objet de développements majeurs ces dernières années, notamment les revêtements composites Al₂O₃ - SiC ou ZrO₂ - Y₂O₃, qui combinent les avantages de plusieurs matériaux pour offrir une protection plus complète. Par exemple, les revêtements composites Al₂O₃ - SiC allient la haute résistance à l'oxydation de l'Al₂O₃ et la résistance aux chocs thermiques du SiC, ce qui les rend adaptés aux composants MoSi₂ soumis à des conditions de travail complexes.

Le choix du type de revêtement doit être optimisé en fonction de l'environnement d'application spécifique. Par exemple, les fours de traitement thermique des semi-conducteurs nécessitent des revêtements de haute pureté pour éviter la contamination, tandis que les fours de fusion du verre accordent une plus grande importance à la résistance aux chocs thermiques et à la corrosion du revêtement. Le procédé de préparation du revêtement a également un impact significatif sur ses performances.

La projection plasma permet de former des revêtements épais et denses, adaptés aux applications industrielles, tandis que le procédé CVD permet de produire des revêtements plus uniformes et plus fins, offrant une meilleure adhérence, répondant aux exigences de haute précision. De plus, l'épaisseur et l'uniformité du revêtement doivent être contrôlées avec précision.

Un revêtement trop épais peut se fissurer en raison d'une inadéquation des contraintes thermiques, tandis qu'un revêtement trop fin peut ne pas offrir une protection adéquate. À l'avenir, le développement de revêtements nanostructurés et de revêtements composites multicouches devrait améliorer encore les performances de surface des éléments chauffants en MoSi₂.

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

2.9.2 Étude des fissures de surface et de l'adhérence du revêtement

Les fissures de surface et l'adhérence du revêtement des éléments chauffants en MoSi₂ sont des facteurs clés affectant leur état de surface et leur fiabilité à long terme. Les fissures de surface sont généralement causées par des contraintes thermiques, des contraintes mécaniques ou des défauts de fabrication, notamment en cas de choc thermique ou de fatigue thermique. La fragilité à basse température du MoSi₂ (ténacité à la rupture d'environ 2 à 3 MPa·m^{1/2}) favorise la formation de microfissures lors de variations rapides de température ou de vibrations mécaniques. Ces fissures peuvent s'étendre le long des joints de grains, entraînant à terme la rupture du composant ou la rupture du film protecteur de SiO₂. Dans la plage de températures critiques de 400 à 700 °C, les fissures de surface peuvent aggraver l'oxydation et le poudrage, détériorant ainsi davantage l'état de surface. L'adhérence du revêtement détermine la capacité du revêtement protecteur à adhérer durablement au substrat en MoSi₂ afin d'éviter tout décollement ou fissuration. Les revêtements dont l'adhérence est insuffisante ont tendance à se détacher lors des cycles à haute température, exposant le substrat à des environnements d'oxydation ou de corrosion, réduisant ainsi la durée de vie du composant. La formation de fissures de surface est influencée par de nombreux facteurs. La pureté du matériau est un facteur important. Un MoSi₂ de haute pureté peut réduire les impuretés aux joints de grains et diminuer le risque d'amorçage de fissures. La microstructure a un effet significatif sur la propagation des fissures. Le MoSi₂ dense (comme celui obtenu par frittage à chaud) présente moins de pores et de défauts, ce qui peut efficacement inhiber la propagation des fissures, tandis que les échantillons à porosité plus élevée sont sujets aux fissures en raison de la concentration de contraintes. La modification du dopage peut améliorer la résistance aux fissures de surface. Par exemple, l'ajout d'oxydes de terres rares (comme Y₂O₃) peut améliorer la force de liaison aux joints de grains et réduire la propagation des fissures, tandis que certains dopages métalliques (comme W) peuvent augmenter le risque de fissures en raison d'un décalage de dilatation thermique. Le processus de préparation et le traitement de surface sont également cruciaux. Le polissage de surface peut réduire les défauts initiaux, tandis que les surfaces rugueuses peuvent devenir des points d'amorçage de fissures.

La recherche sur l'adhérence des revêtements se concentre principalement sur les caractéristiques de l'interface, la compatibilité des dilatations thermiques et le procédé de revêtement. La différence de coefficient de dilatation thermique entre le MoSi₂ et les revêtements (tels que Al₂O₃ et SiC) entraîne une contrainte thermique à l'interface, affectant l'adhérence. Par exemple, les revêtements SiC sont généralement plus performants que les revêtements Al₂O₃, car leurs coefficients de dilatation thermique sont plus proches de ceux du MoSi₂. Les technologies de traitement d'interface (comme la conception de couches de transition) peuvent améliorer considérablement l'adhérence. Par exemple, l'ajout d'une couche de transition SiC entre le substrat MoSi₂ et le revêtement Al₂O₃ peut atténuer la différence de contrainte thermique. Le procédé de revêtement a également une influence importante sur l'adhérence. Le revêtement formé par projection plasma présente une forte adhérence, mais peut présenter des micropores, tandis que le revêtement généré par CVD est plus uniforme et offre une adhérence supérieure. Les cycles thermiques et les facteurs environnementaux (tels que l'humidité et l'atmosphère) mettront davantage l'adhérence à l'épreuve. Un environnement très humide peut provoquer des réactions chimiques à l'interface du revêtement et réduire l'adhérence. Des études ont montré que l'optimisation

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

de l'épaisseur du revêtement et de la conception de l'interface (comme le revêtement à gradient) peut améliorer considérablement l'adhérence et réduire le risque de fissures et de pelage.

2.9.3 Formation et protection du film d'oxyde SiO_2 de surface

SiO_2 à la surface de l'élément chauffant en MoSi_2 est essentiel à sa résistance à l'oxydation à haute température, ce qui détermine sa stabilité à long terme et sa durée de vie en atmosphère oxydante. Au-dessus de 800°C , la surface du MoSi_2 réagit $2\text{MoSi}_2 + 7\text{O}_2 \rightarrow 2\text{MoO}_3 + 4\text{SiO}_2$ pour former un film dense de SiO_2 . Ce film présente un faible coefficient de diffusion de l'oxygène et une bonne capacité d'auto-cicatrisation, ce qui empêche efficacement l'oxygène de pénétrer dans le substrat et protège le MoSi_2 d'une nouvelle érosion par oxydation. Entre 1200 et 1850°C , le film SiO_2 reste stable, permettant à l'élément chauffant en MoSi_2 de fonctionner longtemps en atmosphère oxydante à haute température. Sa température maximale de fonctionnement peut atteindre 1850°C et il est largement utilisé dans le frittage de la céramique, la fusion du verre et d'autres procédés. Cependant, dans la plage de températures de « peste » de 400 à 700°C , le MoSi_2 s'oxyde et génère un mélange non protecteur de MoO_3 et de SiO_2 , ce qui entraîne la formation d'un film lâche et la pulvérisation du matériau, ce qui affecte gravement les performances de protection de surface. Afin d'éviter la « peste », cette plage de températures est généralement franchie rapidement dans les applications pratiques.

de SiO_2 sont influencés par de nombreux facteurs. La pureté du matériau est cruciale pour leur qualité. Un MoSi_2 de haute pureté permet de produire un film de SiO_2 plus dense et plus uniforme, tandis que les impuretés (telles que Fe et Al) peuvent provoquer des défauts et réduire l'effet protecteur. La microstructure joue également un rôle important. Le MoSi_2 dense (par exemple, frittage à chaud) présente moins de pores de surface, ce qui favorise la formation d'un film de SiO_2 continu. En revanche, les échantillons à forte porosité peuvent former une couche irrégulière et réduire la résistance à l'oxydation. La modification du dopage a un double effet sur les performances des films de SiO_2 . Les oxydes de terres rares (tels que Y_2O_3) peuvent améliorer l'adhérence et la stabilité du film, tandis que certains dopages métalliques (tels que W) peuvent réduire la qualité du film en modifiant la cinétique d'oxydation. L'atmosphère et l'humidité de l'environnement de travail ont un effet significatif sur la formation et la protection des films de SiO_2 . Dans un environnement très humide, le film de SiO_2 peut subir des réactions d'hydratation pour former une structure silicate lâche, réduisant ainsi son pouvoir protecteur. Dans un environnement réducteur ou sous vide, le film de SiO_2 ne peut se former ou est détruit, ce qui entraîne la volatilisation du silicium et la dégradation du substrat.

Le film SiO_2 est essentiel aux performances de l'élément chauffant MoSi_2 . Lors d'un fonctionnement prolongé à haute température, le film SiO_2 peut s'amincir en raison de la volatilisation du Si ou du MoO_3 . En particulier, à des températures extrêmes proches de 1850°C , il peut être partiellement endommagé. Des cycles thermiques fréquents peuvent également provoquer des fissures ou un décollement du film, réduisant ainsi son effet protecteur. Afin d'améliorer la stabilité du film SiO_2 , les éléments MoSi_2 modernes utilisent souvent une technologie de modification de surface, comme un traitement de préoxydation pour former une couche initiale dense, ou ajoutent des revêtements protecteurs (tels que Al_2O_3 ou SiC) pour améliorer la résistance aux chocs thermiques et la durabilité du film. Dans la pratique, le maintien d'une atmosphère oxydante stable, l'évitement des environnements à forte humidité et

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

L'optimisation des paramètres du cycle thermique sont des mesures efficaces pour maintenir les performances protectrices du film SiO_2 . À l'avenir, les axes de recherche pourraient se concentrer sur l'optimisation de la cinétique de formation du film SiO_2 et le développement de couches protectrices composites pour améliorer encore les performances de surface et la durée de vie des éléments chauffants MoSi_2 .

2.10 Problèmes de surface des éléments chauffants en MoSi_2 et leurs solutions

En disiliciure de molybdène (MoSi_2) sont des facteurs importants affectant leurs performances à haute température et leur durée de vie, notamment les fissures de surface, l'oxydation dite « peste », la dégradation du film protecteur de SiO_2 et le pelage du revêtement. Ces problèmes sont particulièrement importants lors de cycles à haute température, de chocs thermiques ou d'environnements atmosphériques spécifiques, pouvant entraîner une dégradation des performances des composants, voire une défaillance. Les fissures de surface sont généralement causées par des contraintes thermiques, des contraintes mécaniques ou des défauts de fabrication. La fragilité à basse température du MoSi_2 favorise la formation de microfissures lors de variations rapides de température ou de vibrations mécaniques, qui se transforment ensuite en macrofissures, affaiblissant ainsi la résistance à l'oxydation et la résistance mécanique. Dans la plage de températures dite « peste » de 400 à 700 °C, la surface du MoSi_2 s'oxyde et génère un mélange non protecteur de MoO_3 et de SiO_2 , entraînant la pulvérisation du matériau et de graves dommages à l'état de surface. Lors d'un fonctionnement prolongé à haute température, le film protecteur de SiO_2 peut s'amincir en raison de la volatilisation du Si ou du MoO_3 . À des températures extrêmes proches de 1850 °C, notamment, le film peut être partiellement endommagé, réduisant ainsi son effet protecteur. Le revêtement protecteur appliqué peut se décoller en raison d'une dilatation thermique inadéquate ou d'une liaison insuffisante de l'interface, exposant ainsi le substrat à des environnements oxydants ou corrosifs.

La résolution du problème des fissures de surface peut être obtenue en optimisant le procédé de préparation et en modifiant le matériau. Le frittage par pressage à chaud permet d'améliorer la densité du MoSi_2 , de réduire les pores et les défauts de surface, et donc de diminuer le risque d'amorçage de fissures. Le dopage aux oxydes de terres rares (tels que Y_2O_3) ou à l'alumine peut améliorer la résistance aux joints de grains et inhiber la propagation des fissures. Le polissage de surface peut réduire les défauts initiaux et la concentration de contraintes. Afin de lutter contre l'oxydation par « peste », dans les applications pratiques, la température est généralement rapidement augmentée sur une plage de 400 à 700 °C afin de réduire le temps de génération d'oxydes non protecteurs. De plus, un traitement de pré-oxydation peut pré-générer un film dense de SiO_2 en surface pour améliorer la résistance à l'oxydation par « peste ». Afin de maintenir la stabilité du film de SiO_2 , l'adhérence du film peut être améliorée par l'ajout de terres rares, ou un revêtement composite peut être utilisé pour améliorer la résistance aux chocs thermiques et la durabilité. Pour résoudre le problème de décollement du revêtement, l'optimisation du procédé de revêtement (dépôt chimique en phase vapeur ou projection plasma, par exemple) et de la conception de l'interface (ajout d'une couche de transition SiC , par exemple) peut améliorer la résistance de l'adhésion et réduire les écarts de contrainte thermique. En pratique, le contrôle des vitesses de chauffage et de refroidissement, l'évitement des environnements à forte humidité et la vérification

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

régulière de l'état de surface sont des mesures efficaces pour prolonger la durée de vie des éléments chauffants en MoSi_2 .

À l'avenir, la résolution des problèmes de surface pourrait se concentrer sur le développement de revêtements nanostructurés et de revêtements composites multicouches afin d'améliorer encore la stabilité des films de SiO_2 et leur adhérence. De plus, une technologie de surveillance intelligente permettra de détecter l'état de surface en temps réel, d'ajuster les paramètres de fonctionnement à temps et de prolonger la durée de vie des composants. L'application complète de ces méthodes permettra de résoudre efficacement les problèmes de surface des éléments chauffants en MoSi_2 et d'améliorer leur fiabilité dans les applications à haute température telles que le frittage de céramique et la fusion du verre.

2.11 Facteurs affectant les propriétés thermodynamiques des éléments chauffants en MoSi_2

Les propriétés thermodynamiques des éléments chauffants en MoSi_2 , notamment leur conductivité thermique, leur coefficient de dilatation thermique, leur capacité thermique massique et leur diffusivité, influent directement sur leur efficacité de chauffage, l'homogénéité de la température et leur résistance aux chocs thermiques. Ces propriétés dépendent des propriétés intrinsèques du matériau (telles que sa composition et sa microstructure) et de l'environnement extérieur (tel que la température de fonctionnement et l'atmosphère). La conductivité thermique du MoSi_2 est d'environ $45 \text{ W/(m}\cdot\text{K)}$ à température ambiante et chute à environ $15 \text{ W/(m}\cdot\text{K)}$ à haute température (1500°C), ce qui assure une bonne capacité de transfert thermique. Cependant, sa diminution avec la température affecte l'efficacité du chauffage rapide. Son coefficient de dilatation thermique est d'environ $8,1 \times 10^{-6} \text{ K}^{-1}$, ce qui s'adapte bien au matériau de la matrice céramique et réduit les contraintes thermiques. Cependant, sa fragilité à basse température le rend facilement fissuré sous l'effet des chocs thermiques. La capacité thermique spécifique est d'environ $0,45 \text{ J/(g}\cdot\text{K)}$, qui augmente légèrement à haute température, affectant la diffusivité thermique. Ces propriétés thermodynamiques déterminent conjointement les performances du MoSi_2 dans les fours à haute température.

Le MoSi_2 de haute pureté peut réduire la diffusion des phonons causée par les impuretés (telles que Fe et C), améliorer la conductivité thermique, réduire les défauts aux joints de grains et améliorer la répartition des contraintes thermiques. La microstructure a un effet significatif sur les propriétés thermodynamiques. Le MoSi_2 dense (par exemple, préparé par pressage à chaud et frittage) présente une conductivité thermique et une résistance aux chocs thermiques supérieures, tandis que les échantillons à forte porosité présentent de faibles performances en raison de la chaleur diffusée et de la concentration des contraintes. La modification du dopage peut optimiser les propriétés thermodynamiques. Par exemple, l'ajout de W peut légèrement augmenter la conductivité thermique, mais peut également augmenter les contraintes thermiques en raison d'un décalage de dilatation thermique ; le dopage aux oxydes de terres rares (tels que Y_2O_3) peut améliorer la résistance aux joints de grains et la résistance aux chocs thermiques. Les procédés de préparation tels que le pressage à chaud ou le frittage par réaction ont également une influence importante sur les propriétés thermodynamiques. Les échantillons à haute densité présentent généralement une meilleure conductivité thermique et une meilleure résistance aux contraintes thermiques.

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

L'influence de l'environnement extérieur sur les propriétés thermodynamiques est incontournable. La température et l'atmosphère de fonctionnement affectent directement la conductivité thermique, la dilatation thermique et la résistance aux chocs thermiques en modifiant l'état de surface et la structure interne du matériau. Dans la pratique, l'optimisation de la conception des composants (par exemple, l'augmentation de la surface de l'extrémité chaude) et le contrôle des conditions de fonctionnement (par exemple, la stabilisation du gradient de température) peuvent améliorer les performances thermodynamiques et répondre aux besoins d'applications exigeantes telles que le frittage de céramique et le traitement thermique des semi-conducteurs.

2.11.1 Effet de la température de fonctionnement

La température de fonctionnement est le facteur clé affectant les propriétés thermodynamiques des éléments chauffants en MoSi_2 , déterminant directement leurs performances en termes de conductivité thermique, de coefficient de dilatation thermique et de résistance aux chocs thermiques. Entre la température ambiante et $1\,000\text{ }^\circ\text{C}$, la conductivité thermique du MoSi_2 chute d'environ $45\text{ W/(m}\cdot\text{K)}$ à environ $25\text{ W/(m}\cdot\text{K)}$, principalement en raison de la diffusion accrue des phonons et de la contribution réduite de la conductivité thermique électronique à haute température. Entre $1\,000$ et $1\,850\text{ }^\circ\text{C}$, la conductivité thermique chute encore à environ $15\text{ W/(m}\cdot\text{K)}$, tout en répondant aux exigences de transfert thermique d'applications telles que le frittage de céramique et la fusion du verre. Le coefficient de dilatation thermique augmente légèrement à haute température, mais reste compris entre 8 et $9 \times 10^{-6}\text{ K}^{-1}$, ce qui s'adapte bien à la matrice céramique et réduit les contraintes thermiques. Cependant, la ténacité à la rupture du MoSi_2 à haute température est faible ($2\text{--}3\text{ MPa}\cdot\text{m}^{1/2}$), et des microfissures se forment facilement sous l'effet des contraintes thermiques lors de variations rapides de température, ce qui affecte la stabilité des propriétés thermodynamiques. Le fonctionnement à haute température affecte également la formation et la stabilité du film protecteur de SiO_2 . Au-dessus de $800\text{ }^\circ\text{C}$, le film dense de SiO_2 protège efficacement le substrat, mais à des températures extrêmes proches de $1850\text{ }^\circ\text{C}$, la volatilisation du Si et du MoO_3 peut entraîner un amincissement de la couche de film, réduisant ainsi la stabilité à long terme des propriétés thermodynamiques. Dans la plage de températures extrêmes de 400 à $700\text{ }^\circ\text{C}$, la génération d'oxydes non protecteurs provoque la pulvérisation du matériau, détériorant davantage la conductivité thermique et la résistance aux chocs thermiques. Afin de réduire les effets néfastes de la température de fonctionnement, dans les applications pratiques, la stabilité des propriétés thermodynamiques peut être améliorée en optimisant les vitesses de chauffage et de refroidissement, en utilisant un traitement de préoxydation pour former le film initial de SiO_2 et en appliquant un revêtement protecteur (tel que Al_2O_3 ou SiC). En termes de conception de composants, l'utilisation de structures de type U ou W peut disperser les contraintes thermiques et améliorer les performances thermodynamiques à haute température.

2.11.2 Influence de l'atmosphère

L'atmosphère a un effet significatif sur les propriétés thermodynamiques des éléments chauffants en MoSi_2 , principalement en modifiant l'état de surface et la structure interne du matériau. En atmosphère oxydante, le film protecteur de SiO_2 formé à la surface du MoSi_2 maintient efficacement la stabilité des propriétés thermodynamiques. Le faible coefficient de diffusion de l'oxygène du film de SiO_2 assure la

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

constance à long terme de la conductivité thermique et du coefficient de dilatation thermique, tout en protégeant le substrat de la corrosion par oxydation. Cependant, une atmosphère oxydante à forte humidité peut entraîner l'hydratation du film de SiO_2 , formant une structure silicate lâche, réduisant ainsi la conductivité thermique et la résistance aux chocs thermiques. En atmosphère réductrice (telle que H_2) ou sous vide, le film de SiO_2 ne peut se former ou est détruit, ce qui entraîne la volatilisation du silicium et la dégradation du substrat, une diminution significative de la conductivité thermique et une augmentation des contraintes thermiques pouvant provoquer des fissures, affectant gravement les propriétés thermodynamiques.

Les atmosphères inertes (comme Ar , N_2) ont peu d'effet sur les propriétés thermodynamiques du MoSi_2 , mais un fonctionnement à long terme peut lentement former un film de SiO_2 en raison de la présence de traces d'oxygène, modifiant légèrement la conductivité thermique. Les impuretés présentes dans l'atmosphère (comme les sulfures et les chlorures) peuvent réagir avec la surface du MoSi_2 pour former des composés non protecteurs, réduisant ainsi la stabilité des propriétés thermodynamiques. Afin de faire face à l'influence de l'atmosphère, une atmosphère oxydante stable doit être privilégiée dans les applications pratiques afin d'éviter une humidité élevée ou des environnements réducteurs. Les revêtements de surface (tels que SiC ou Al_2O_3) peuvent améliorer la résistance à la corrosion et maintenir les propriétés thermodynamiques. De plus, une inspection régulière de la pureté de l'atmosphère et de l'état de surface du composant, ainsi que l'optimisation des paramètres de fonctionnement (comme le contrôle de l'humidité atmosphérique) sont des mesures efficaces pour garantir la stabilité des propriétés thermodynamiques de l'élément chauffant en MoSi_2 .

2.11.3 Effet de la fréquence de chauffage/refroidissement

A un impact significatif sur les propriétés thermodynamiques des éléments chauffants en disiliciure de molybdène (MoSi_2), en particulier dans les applications nécessitant des cycles thermiques fréquents, telles que les fours de frittage de céramique, les fours de recuit du verre et les équipements de traitement thermique des métaux. Les propriétés thermodynamiques du MoSi_2 , notamment sa conductivité thermique, son coefficient de dilatation thermique et sa diffusivité, sont mises à rude épreuve par les contraintes thermiques lors des cycles rapides de chauffage/refroidissement. Des cycles thermiques fréquents provoquent des contraintes thermiques répétées sur la microstructure du MoSi_2 , ce qui peut déclencher l'initiation et la propagation de microfissures, notamment en raison de sa fragilité à basse température (ténacité à la rupture d'environ $2-3 \text{ MPa} \cdot \text{m}^{1/2}$), réduisant ainsi sa conductivité thermique et sa résistance aux chocs thermiques. De plus, dans la plage de température de « peste » de 400 à 700°C , un cycle thermique rapide peut aggraver la formation d'oxydes non protecteurs (un mélange de MoO_3 et de SiO_2), entraînant un poudrage de surface et une détérioration supplémentaire des propriétés thermodynamiques.

L'effet de la fréquence de chauffage/refroidissement est étroitement lié à la plage de température et à la cadence du cycle. Lors de cycles à grande échelle, de hautes températures ($1200-1850^\circ\text{C}$) à basses températures (température ambiante ou $400-700^\circ\text{C}$), les contraintes thermiques sont plus importantes, ce qui peut provoquer des fissures ou un décollement du film protecteur de SiO_2 , affaiblissant ainsi la résistance à l'oxydation et la conductivité thermique. Les cycles à haute fréquence (tels que des

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

chauffages et refroidissements répétés par heure) accélèrent les dommages par fatigue de la microstructure et réduisent la durée de vie du composant, tandis que les cycles à basse fréquence (par exemple, une fois par jour) ont relativement peu d'effet sur les propriétés thermodynamiques. La pureté et la microstructure du matériau sont essentielles à sa tolérance aux cycles thermiques. Un MoSi₂ de haute pureté peut réduire l'affaiblissement des joints de grains dû aux impuretés et limiter le risque de propagation des fissures. Les microstructures denses (telles que celles préparées par pressage à chaud et frittage) peuvent disperser efficacement les contraintes thermiques et améliorer la résistance à la fatigue thermique, tandis que les échantillons à porosité plus élevée sont sujets aux fissures dues à la concentration des contraintes. La modification du dopage peut également améliorer les performances en cyclage thermique. Par exemple, l'ajout d'oxydes de terres rares (tels que Y₂O₃) peut améliorer la résistance aux joints de grains et inhiber la propagation des fissures. Afin d'atténuer les effets néfastes de la fréquence de chauffage/refroidissement, diverses mesures d'optimisation peuvent être prises dans les applications pratiques. Le contrôle des vitesses de chauffage et de refroidissement peut réduire l'accumulation de contraintes thermiques et éviter un passage rapide dans la plage de températures de 400 à 700 °C afin d'inhiber l'oxydation par « peste ». Les revêtements de surface (tels que Al₂O₃ ou SiC) peuvent améliorer la résistance aux chocs thermiques et la stabilité des films de SiO₂, prolongeant ainsi la durée de vie en cyclage thermique. L'optimisation de la conception des composants (par exemple, l'utilisation de structures en U ou en W) peut disperser les contraintes thermiques et réduire l'amorçage des fissures. La vérification régulière de l'état de surface et le réglage des paramètres du cycle thermique peuvent également étendre efficacement la stabilité des propriétés thermodynamiques de l'élément chauffant MoSi₂ pour répondre aux besoins des applications de cycle thermique haute fréquence.

2.11.4 Influence de la tension de fonctionnement

La tension de fonctionnement est un facteur externe clé affectant les performances thermodynamiques et la stabilité de fonctionnement des éléments chauffants en MoSi₂. Elle est directement liée à son efficacité de chauffage, à la répartition de la température et à sa durée de vie. La résistivité du MoSi₂ présente un coefficient de température positif, d'environ $2,0 \times 10^{-5}$ à température ambiante ($\Omega \cdot \text{cm}$), qui passe à environ $4,0 \times 10^{-5}$ à 1 000 °C ($\Omega \cdot \text{cm}$) et à environ $4,5 \times 10^{-5}$ à 1 500 °C ($\Omega \cdot \text{cm}$). Cette propriété permet au MoSi₂ d'ajuster sa puissance de sortie de manière adaptative à différentes tensions, mais elle peut avoir un effet négatif sur les propriétés thermodynamiques sous haute tension ou dans des conditions de tension instable. La haute tension provoque un échauffement rapide du composant et génère d'importantes contraintes thermiques, notamment dans le MoSi₂, dont la fragilité à basse température est importante, ce qui peut provoquer des microfissures et réduire la conductivité thermique et la résistance aux chocs thermiques. De plus, la haute tension peut provoquer une surchauffe locale, accélérer la volatilisation du Si ou du MoO₃ du film protecteur de SiO₂ en surface, amincir ce film et affaiblir sa résistance à l'oxydation.

Les fluctuations de tension sont également un facteur important affectant les propriétés thermodynamiques. De fréquentes fluctuations de tension peuvent provoquer une instabilité du courant, entraînant une répartition inégale de la température à l'intérieur du composant, augmentant la concentration des contraintes thermiques, puis provoquant des dommages microstructuraux ou des fissures de surface. Un fonctionnement à haute tension à long terme peut accélérer le vieillissement du

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

MoSi₂ , notamment par dérive de résistivité ou croissance des grains, et réduire la diffusivité et la conductivité thermiques. La pureté et la microstructure du matériau jouent un rôle important dans la tolérance aux effets de tension. Un MoSi₂ de haute pureté peut réduire les irrégularités de résistance locales causées par les impuretés et diminuer le risque de surchauffe. Les microstructures denses (telles que celles préparées par pressage à chaud et frittage) peuvent améliorer la capacité à disperser les contraintes thermiques et renforcer la résistance aux fluctuations de tension. Les modifications de dopage (comme l'ajout de W ou de Nb) peuvent optimiser la résistivité et améliorer la stabilité électrothermique sous tension, mais la résistance à l'oxydation doit être équilibrée.

Pour atténuer les effets néfastes de la tension utilisée, la stratégie de contrôle de la tension doit être optimisée dans les applications pratiques. L'utilisation d'un système d'alimentation stable et d'un régulateur de tension permet de réduire les fluctuations et d'assurer un chauffage uniforme. L'adaptation des résistances des extrémités froide et chaude (par exemple, le dopage de l'extrémité froide avec un matériau hautement conducteur) peut réduire le risque de surchauffe locale et améliorer l'efficacité énergétique. L'application d'un revêtement protecteur (tel que SiC ou Al₂O₃) peut améliorer la résistance à l'oxydation de surface et la tolérance aux contraintes thermiques, et prolonger la durée de vie du composant. De plus, une surveillance régulière de la tension d'entrée et de l'état de surface du composant, associée à une conception appropriée de la courbe de chauffe (par exemple, un chauffage lent), permet de maintenir efficacement les propriétés thermodynamiques de l'élément chauffant en MoSi₂ et de répondre aux besoins des applications de haute précision telles que le frittage de céramique et le traitement thermique des semi-conducteurs.

2.11.5 Effet de la densité de courant

L'influence de la température a une influence importante sur les propriétés thermodynamiques et la stabilité à long terme des éléments chauffants en MoSi₂ , et détermine directement leur puissance de chauffage, leur distribution de température et leur vieillissement. En tant que matériau chauffant résistif, la puissance de sortie du MoSi₂ est proportionnelle au carré de la densité de courant ($P = I^2 R$). Une densité de courant élevée augmente donc considérablement la température de l'élément, affectant ainsi sa conductivité thermique, sa dilatation thermique et sa résistance aux chocs thermiques. La conductivité thermique du MoSi₂ est plus faible à haute température (environ 15 W/(m·K) à 1 500 °C) qu'à température ambiante (45 W/(m·K)). Une densité de courant élevée peut provoquer une surchauffe locale et générer d'importantes contraintes thermiques, en particulier dans le MoSi₂ , qui présente une fragilité importante à basse température , ce qui peut facilement provoquer des microfissures ou des fissures du film protecteur de SiO₂ en surface , réduisant ainsi ses propriétés thermodynamiques. De plus, une densité de courant élevée peut accélérer la volatilisation du Si ou du MoO₃ du film SiO₂ , rendant le film plus fin et affaiblissant la résistance à l'oxydation, en particulier à une température extrême proche de 1850°C. L'uniformité de la distribution de la densité de courant est essentielle aux performances thermodynamiques. Une densité de courant non uniforme (telle qu'une densité de courant locale élevée due à des défauts de conception des composants ou à un mauvais contact) entraîne une augmentation des gradients de température, des contraintes thermiques et des risques de fissures, ainsi qu'une réduction de la diffusivité thermique. Un fonctionnement prolongé à haute densité de courant peut entraîner une dérive de résistivité ou une dégradation microstructurale du MoSi₂ (comme une croissance ou un affaiblissement

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

des joints de grains), affectant ainsi la conductivité thermique et la résistance aux chocs thermiques. La pureté et la microstructure du matériau ont un effet significatif sur la tolérance à la densité de courant. Un MoSi_2 de haute pureté peut réduire les irrégularités de résistance locales causées par les impuretés et diminuer le risque de surchauffe. Les microstructures denses (telles que le pressage à chaud et la préparation au frittage) peuvent améliorer les capacités de dispersion des contraintes thermiques et renforcer la résistance aux chocs de densité de courant. Une modification du dopage (comme l'ajout de Y_2O_3) peut optimiser la structure des joints de grains, stabiliser la résistivité et améliorer les propriétés thermodynamiques sous densité de courant.

Afin d'atténuer les effets néfastes de la densité de courant utilisée, il est nécessaire d'optimiser la conception des composants et leurs conditions de fonctionnement dans les applications pratiques. Des composants en U ou en W, à section uniforme, garantissent une distribution uniforme de la densité de courant et réduisent la surchauffe locale. L'adaptation de la résistance entre les extrémités froide et chaude (par exemple, le dopage de l'extrémité froide avec des matériaux hautement conducteurs) peut réduire la concentration de densité de courant et améliorer l'efficacité énergétique. L'application d'un revêtement protecteur (tel que Al_2O_3 ou SiC) peut améliorer la résistance à l'oxydation de surface et aux contraintes thermiques, et prolonger la durée de vie du composant. L'utilisation d'un régulateur de courant pour stabiliser le courant d'entrée, éviter une densité de courant excessive et vérifier régulièrement l'état de surface et les propriétés électriques du composant sont des mesures efficaces pour maintenir la stabilité des propriétés thermodynamiques de l'élément chauffant en MoSi_2 . Ces stratégies d'optimisation peuvent répondre aux besoins des applications haute puissance telles que la fusion du verre et le traitement thermique des métaux.

2.11.6 Impact de la méthode d'installation

L'H a une influence importante sur les performances thermodynamiques et la durée de vie des éléments chauffants en disiliciure de molybdène (MoSi_2), directement liée à la répartition des contraintes thermiques, à l'uniformité de la température et à la stabilité mécanique. Les propriétés thermodynamiques du MoSi_2 , notamment sa conductivité thermique, son coefficient de dilatation thermique et sa diffusivité, peuvent être affectées par des contraintes thermiques ou mécaniques en cas de méthodes d'installation inappropriées. Les méthodes d'installation courantes incluent la suspension verticale, le support horizontal et le serrage, chacun ayant des effets différents sur les propriétés thermodynamiques. La suspension verticale est la méthode d'installation la plus courante pour les éléments chauffants en MoSi_2 . Elle convient aux éléments en U ou en W.

Elle peut réduire les contraintes mécaniques et permettre la libre dilatation thermique des éléments à haute température, diminuant ainsi les contraintes thermiques. Cependant, une mauvaise conception du point de suspension (par exemple, concentration de contraintes au point de contact) peut entraîner des fissures locales et réduire la conductivité thermique et la résistance aux chocs thermiques. L'installation horizontale des supports est généralement utilisée pour les éléments de type tige droite, mais il est nécessaire de s'assurer que le matériau de support (par exemple, l'alumine de haute pureté) correspond au coefficient de dilatation thermique du MoSi_2 , faute de quoi la concentration de contraintes peut être causée par une inadéquation de la dilatation thermique, affectant ainsi la diffusivité thermique. La

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

méthode de fixation par serrage est plus courante dans les petits fours, mais une force de serrage excessive peut provoquer des microfissures dans le MoSi₂ en raison de sa fragilité à basse température, affaiblissant ainsi ses propriétés thermodynamiques.

La méthode d'installation affecte également la stabilité et la résistance à l'oxydation du film protecteur de surface en SiO₂. Une contrainte d'installation inégale peut provoquer des fissures dans le film de surface, en particulier dans la plage de températures de « peste » de 400 à 700 °C, où les fissures peuvent aggraver la formation d'oxydes non protecteurs et réduire la conductivité thermique et la résistance aux chocs thermiques. De plus, la méthode d'installation a un effet indirect sur la distribution du courant et l'uniformité de la température. Par exemple, un mauvais contact peut entraîner une augmentation de la densité de courant locale, provoquant une surchauffe et accélérant la dégradation du film de SiO₂. Afin d'optimiser l'impact de la méthode d'installation, il est nécessaire de sélectionner une conception d'installation adaptée au type de four utilisé, par exemple en utilisant des supports en céramique de haute pureté pour réduire les écarts de dilatation thermique et en utilisant un serrage flexible pour réduire les contraintes mécaniques. Un bon contact entre le point d'installation et l'extrémité froide du MoSi₂ peut améliorer l'uniformité du courant et réduire la surchauffe locale. La vérification régulière de l'usure et du desserrage du point d'installation, combinée à une vitesse de chauffage et de refroidissement raisonnable (par exemple 5 à 10 °C/min), peut maintenir efficacement les propriétés thermodynamiques de l'élément chauffant MoSi₂ et prolonger sa durée de vie dans des applications telles que le frittage de la céramique et la fusion du verre.

2.11.7 Impact de la qualité et de la pureté des composants

MoSi₂ sont les principaux facteurs intrinsèques affectant leurs propriétés thermodynamiques, déterminant directement leur conductivité thermique, leur coefficient de dilatation thermique, leur résistance aux chocs thermiques et leur stabilité à long terme. Le MoSi₂ de haute pureté (pureté généralement $\geq 99,5\%$) peut améliorer considérablement les propriétés thermodynamiques. Sa conductivité thermique est d'environ 45 W/(m·K) à température ambiante et d'environ 15 W/(m·K) à 1 500 °C. Son coefficient de diffusion thermique est d'environ $1,6 \times 10^{-5}$ m²/s à température ambiante et d'environ $0,8 \times 10^{-5}$ m²/s à 1 500 °C. Les matériaux de haute pureté peuvent réduire la diffusion des phonons et l'affaiblissement des joints de grains causés par les impuretés (telles que Fe, Al et C), améliorant ainsi la conductivité thermique et les capacités de dispersion des contraintes thermiques. La présence d'impuretés peut entraîner une inhomogénéité locale de la résistance, augmenter la concentration des contraintes thermiques, réduire la résistance aux chocs thermiques et même induire des microfissures, notamment dans la phase fragile à basse température du MoSi₂. De plus, les impuretés peuvent réagir avec l'oxygène pour former des oxydes non protecteurs, affaiblissant la densité du film protecteur de SiO₂ en surface, réduisant ainsi la stabilité de la résistance à l'oxydation et les propriétés thermodynamiques, notamment dans la plage de températures de « peste » de 400 à 700 °C, où les impuretés aggravent la pulvérisation du matériau.

Le MoSi₂ préparé par frittage à chaud présente une densité élevée (proche de plus de 98 % de la densité théorique), une faible porosité et une meilleure conductivité thermique et résistance aux chocs thermiques que les échantillons préparés par frittage réactionnel ou par synthèse auto-propagée à haute température

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

(SHS). Les composants à forte porosité présentent une faible conductivité thermique en raison de la diffusion de la chaleur par les pores et de la concentration des contraintes, et sont sujets aux fissures lors des cycles thermiques, ce qui réduit le coefficient de diffusion thermique.

MoSi₂ de haute qualité doivent également présenter une microstructure uniforme et une granulométrie modérée (généralement de 10 à 50 µm). Des grains trop gros peuvent entraîner une diminution de la résistance des joints de grains, tandis que des grains trop petits peuvent augmenter la diffusion aux joints de grains et réduire la conductivité thermique. La modification du dopage peut optimiser davantage les effets sur la qualité et la pureté. Par exemple, l'ajout d'oxydes de terres rares (comme Y₂O₃) peut améliorer la liaison des joints de grains et la résistance aux chocs thermiques, tandis que les dopants de haute pureté peuvent éviter l'introduction d'impuretés supplémentaires.

Afin d'améliorer la qualité et la pureté des composants, des matières premières de haute pureté (telles que des poudres de Mo et de Si de haute pureté) doivent être sélectionnées et le processus de préparation doit être strictement contrôlé dans les applications pratiques. Le frittage par pressage à chaud ou la projection plasma peuvent améliorer la densité et réduire la porosité et les défauts. Des techniques de contrôle qualité (telles que la diffraction des rayons X et la microscopie électronique à balayage) peuvent garantir la pureté des composants et l'uniformité de la microstructure. L'application de revêtements protecteurs (tels que SiC ou Al₂O₃) peut également compenser le manque de résistance à l'oxydation des matériaux de faible pureté. Une inspection régulière de l'état de surface et des performances des composants, combinée à des conditions de fonctionnement stables (par exemple, éviter une humidité élevée ou une atmosphère réductrice), peut optimiser les propriétés thermodynamiques des éléments chauffants en MoSi₂ afin de répondre aux besoins d'applications exigeantes telles que le traitement thermique des semi-conducteurs et des métaux.

2.11.8 Effet du traitement de protection du revêtement

Le traitement de protection par revêtement influence considérablement les propriétés thermodynamiques des éléments chauffants en MoSi₂ et peut améliorer significativement leur résistance à l'oxydation, aux chocs thermiques et à la conductivité thermique. Les revêtements protecteurs couramment utilisés comprennent les revêtements d'oxyde (tels que Al₂O₃, ZrO₂), les revêtements en carbure (tels que SiC) et les revêtements composites (tels que Al₂O₃ - SiC), qui forment une couche protectrice dense pour compenser la déficience du film SiO₂ à la surface du MoSi₂ dans des conditions extrêmes. Le revêtement Al₂O₃ peut améliorer efficacement la résistance à l'oxydation et maintenir la stabilité de la conductivité thermique (environ 15 W/(m·K) à 1500°C) en raison de son point de fusion élevé (environ 2050°C) et de son faible coefficient de diffusion de l'oxygène (environ 10⁻¹⁴ cm²/s à 1500°C), en particulier dans une atmosphère oxydante à haute température (1200-1850°C).

SiC présente une meilleure correspondance entre le coefficient de dilatation thermique (environ 4,5 × 10⁻⁶ K⁻¹) et le MoSi₂ (environ 8,1 × 10⁻⁶ K⁻¹), ce qui réduit les écarts de contrainte thermique et améliore la résistance aux chocs thermiques, ce qui le rend adapté aux environnements à cycles thermiques élevés tels que les fours de frittage de céramique. Les revêtements composites combinent les avantages de plusieurs matériaux. Par exemple, les revêtements Al₂O₃ - SiC présentent à la fois une

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

résistance élevée à l'oxydation et aux chocs thermiques, améliorant considérablement la stabilité à long terme des propriétés thermodynamiques.

L'amélioration des propriétés thermodynamiques des revêtements est étroitement liée à leur adhérence, leur épaisseur et leur uniformité. Les revêtements de haute qualité (tels que ceux préparés par dépôt chimique en phase vapeur (CVD)) présentent une adhérence et une uniformité élevées, peuvent disperser efficacement les contraintes thermiques et maintenir la stabilité du coefficient de diffusion thermique (environ $0,8 \times 10^{-5} \text{ m}^2/\text{s}$ à $1\,500\text{ °C}$). Des revêtements trop épais ($> 100\text{ }\mu\text{m}$) peuvent provoquer des fissures dues à un décalage de dilatation thermique et réduire la conductivité thermique, tandis que des revêtements trop minces ($< 10\text{ }\mu\text{m}$) peuvent ne pas offrir une protection adéquate. Le procédé de revêtement a également un impact significatif sur les propriétés thermodynamiques. La projection plasma peut former des revêtements épais et denses, adaptés aux applications industrielles, mais peuvent présenter des micropores et réduire légèrement la conductivité thermique ; les revêtements minces générés par les procédés CVD sont plus uniformes, présentent une faible contrainte thermique et conviennent aux exigences de haute précision. Les revêtements peuvent également réduire l'impact de l'oxydation dite « peste » ($400\text{--}700\text{ °C}$). Par exemple, les revêtements SiC peuvent inhiber la formation de MoO_3 non protecteur et préserver les propriétés thermodynamiques.

La stabilité à long terme du revêtement est affectée par l'environnement de travail. Dans un environnement très humide, le revêtement Al_2O_3 peut subir une réaction d'hydratation, réduisant ainsi sa conductivité thermique ; dans un environnement réducteur ou sous vide, il peut se détériorer par volatilisation du silicium, affectant ainsi son coefficient de diffusion thermique. Afin d'optimiser l'impact du traitement de protection du revêtement, il est nécessaire de sélectionner le type et le procédé de revêtement appropriés en fonction des exigences de l'application. Par exemple, les revêtements CVD haute pureté sont privilégiés pour les fours de traitement thermique des semi-conducteurs, et les revêtements SiC épais peuvent être utilisés pour les fours de fusion du verre. La conception de l'interface (par exemple, l'ajout d'une couche de transition SiC) peut améliorer l'adhérence et réduire le risque de décollement. Un contrôle régulier de l'intégrité et de l'état de surface du revêtement, associé à une atmosphère oxydante stable et à des vitesses de chauffage et de refroidissement appropriées (par exemple, $5\text{ à }10\text{ °C/min}$), peut maximiser l'effet protecteur du revêtement sur les propriétés thermodynamiques de l'élément chauffant MoSi_2 et prolonger sa durée de vie dans les applications à haute température.

2.12 CTIA GROUP LTD Élément chauffant MoSi_2 FDS

Fournit des informations sur l'utilisation, le stockage et la manipulation en toute sécurité des éléments chauffants en disiliciure de molybdène (MoSi_2) produits par CTIA GROUP LTD. Le MoSi_2 est un composé intermétallique présentant une excellente résistance à l'oxydation à haute température et une excellente conductivité électrique. Il est largement utilisé dans les fours industriels et de laboratoire à haute température (tels que le frittage de céramique, la fusion du verre et le traitement thermique des métaux). Vous trouverez ci-dessous une description détaillée du contenu de la fiche signalétique des éléments chauffants en MoSi_2 de CTIA GROUP LTD, basée sur les caractéristiques des matériaux MoSi_2 et les normes industrielles, notamment ses propriétés physiques et chimiques, l'identification des dangers, la sécurité de fonctionnement et les mesures d'urgence.

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

Identification et composition du matériau : Les éléments chauffants MoSi₂ de CTIA GROUP LTD sont principalement composés de disiliciure de molybdène (formule chimique : MoSi₂ , numéro CAS : 12136-78-6), d'une pureté généralement $\geq 99,5\%$, et peuvent contenir des traces d'additifs (tels que des oxydes de terres rares ou de l'oxyde d'aluminium) pour améliorer les performances. Le MoSi₂ est un matériau céramique d'aspect gris métallique, doté d'une structure cristalline tétragonale de type α (type C11b), d'une densité d'environ 6,24 g/cm³, d'un point de fusion d'environ 2 030 °C et d'une conductivité électrique. L'élément chauffant est généralement en forme de U, de W ou de tige droite, et un film protecteur dense de SiO₂ se forme à la surface sous atmosphère oxydante à haute température. Les impuretés possibles comprennent Fe, Al, C, etc., et la teneur est généralement inférieure à 0,1 %, selon le lot de production et le processus de dopage.

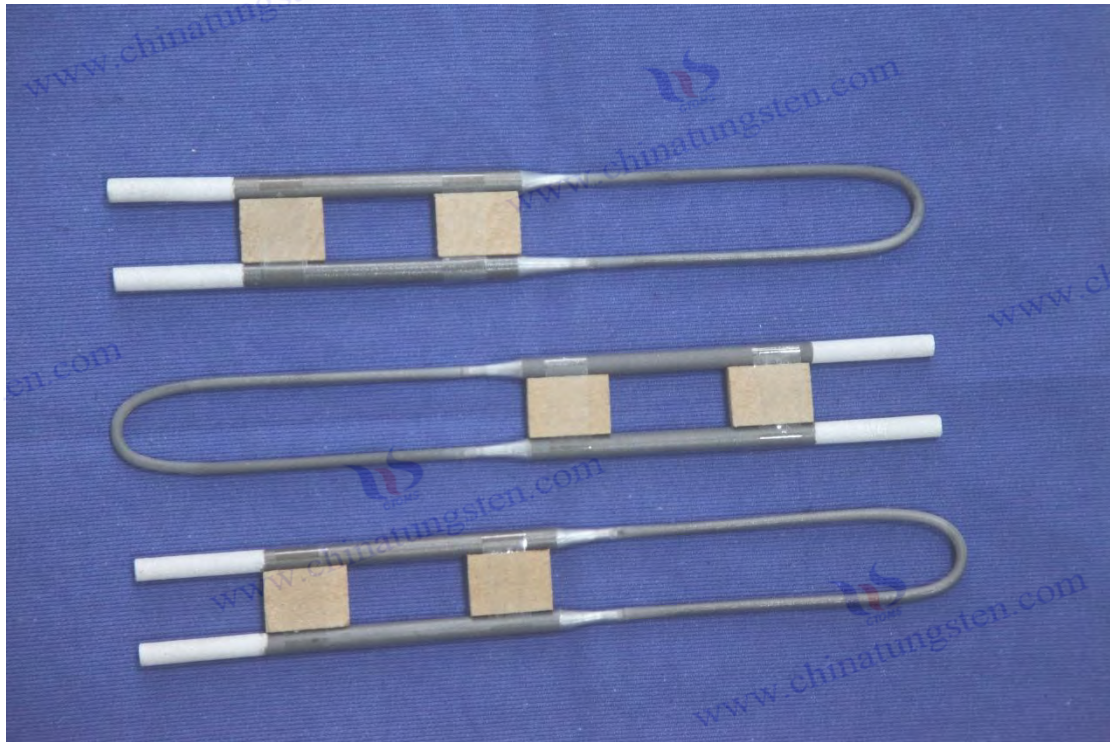
Identification des dangers : Les éléments chauffants en MoSi₂ sont relativement sûrs en utilisation normale à haute température, mais les risques suivants peuvent exister dans certaines conditions. Concernant les risques physiques, le MoSi₂ est cassant à température ambiante et peut facilement se briser sous l'effet d'un choc mécanique ou d'une mauvaise manipulation, produisant des fragments tranchants susceptibles de provoquer des coupures. Concernant les risques chimiques, le MoSi₂ subit une oxydation à basse température dans la plage de températures de « peste » de 400 à 700 °C, générant un mélange de MoO₃ et de SiO₂ , susceptible de libérer des traces de vapeur de MoO₃ (irritant pour les voies respiratoires et les yeux). En environnement réducteur ou sous vide, la volatilisation du silicium peut entraîner une dégradation du matériau et libérer des vapeurs de silicium, dont l'inhalation est déconseillée. Concernant les risques environnementaux, le MoSi₂ a peu d'impact sur l'environnement, mais les composants mis au rebut doivent être traités comme des déchets dangereux afin d'éviter toute pollution.

Fonctionnement en toute sécurité et mesures de protection : Pour garantir une utilisation sûre des éléments chauffants MoSi₂ de CTIA GROUP LTD , la fiche de données de sécurité (FDS) fournit les consignes d'utilisation suivantes. Portez des gants de protection (par exemple, des gants résistants aux hautes températures) et des lunettes de protection lors de la manipulation, évitez tout contact direct avec les bords tranchants et évitez tout dommage mécanique ou tout débris susceptible de blesser des personnes. Des méthodes de fixation appropriées doivent être utilisées lors de l'installation (par exemple, suspension verticale ou serrage flexible) afin d'éviter toute contrainte mécanique excessive pouvant entraîner une rupture. Lors de l'utilisation, assurez-vous que le système d'alimentation est à commande proportionnelle, à déclenchement par phase et doté d'une fonction de limitation de courant afin d'éviter toute commutation non proportionnelle ou toute alimentation électrique « soudaine » susceptible d'endommager les composants. Lors du stockage, placez l'appareil dans un environnement sec et non corrosif afin d'éviter toute corrosion superficielle due à l'humidité ou à une atmosphère acide.

Stockage et transport : Les éléments chauffants en MoSi₂ doivent être stockés dans un environnement sec et propre, avec une température contrôlée entre 5 et 35 °C et une humidité relative inférieure à 70 %. Évitez tout contact avec des substances acides ou des environnements très humides afin de prévenir la corrosion de surface ou la dégradation du film de SiO₂ . Utilisez des caisses en mousse ou en bois pour le transport et fixez les composants pour éviter toute casse due aux vibrations ou aux chocs. L'emballage doit porter les mentions « fragile » et « étanche à l'humidité », et une fiche de données de sécurité doit être jointe pour référence. Pendant le transport, la réglementation relative au transport des marchandises

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

dangereuses (telle que la norme UN3077, substances dangereuses pour l'environnement) doit être respectée pour garantir une arrivée en toute sécurité.



CTIA GROUP LTD Tige de silicium-molybdène

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 Structure et conception des éléments chauffants en MoSi₂

3.1 Structures communes des éléments chauffants en MoSi₂

En disiliciure de molybdène (MoSi₂) sont largement utilisés dans les fours industriels à haute température et les équipements de laboratoire en raison de leur excellente résistance à l'oxydation, de leur conductivité électrique et de leur température maximale de fonctionnement. La conception structurelle influence directement l'efficacité de chauffage, l'homogénéité de la température, la résistance aux chocs thermiques et la durée de vie. Les structures courantes des éléments chauffants en MoSi₂ incluent les types U, W, L, tige droite et les formes personnalisées. Les types U et W sont les plus populaires en raison de leur distribution thermique efficace et de leur flexibilité d'installation. Ces structures se composent généralement d'une extrémité chaude (partie génératrice de chaleur) et d'une extrémité froide (partie de connexion). L'extrémité chaude génère de la chaleur à haute température, tandis que l'extrémité froide réduit la résistance par dopage avec des matériaux hautement conducteurs (tels que l'aluminium ou le tungstène) afin d'assurer la stabilité de la connexion à l'alimentation électrique. La conception structurelle des éléments MoSi₂ doit prendre en compte de manière exhaustive la taille du four, la puissance de chauffage, la fréquence du cycle thermique et la méthode d'installation pour répondre aux besoins de différentes applications telles que le frittage de la céramique, la fusion du verre et le traitement thermique des métaux.

L'optimisation de la conception structurelle est cruciale pour la performance des éléments chauffants en MoSi₂. La longueur, les dimensions de la section et le mode de connexion des extrémités chaude et froide doivent être parfaitement adaptés afin d'assurer une distribution uniforme du courant et d'éviter toute surchauffe locale. Le diamètre de l'extrémité chaude est généralement compris entre 6 et 12 mm, et celui de l'extrémité froide est 1,5 à 2 fois supérieur à celui de l'extrémité chaude afin de réduire la température de l'extrémité froide et de prolonger la durée de vie. La forme géométrique de l'élément (comme le rayon de courbure des éléments de type U ou W) influence la répartition des contraintes thermiques. Une conception de courbure judicieuse peut réduire le risque de fissures dues aux chocs thermiques. La pureté du matériau (généralement $\geq 99,5\%$) et le procédé de préparation (comme le pressage à chaud et le frittage) ont un impact significatif sur l'intégrité structurelle. Un MoSi₂ haute pureté et dense permet de réduire les micro-défauts et d'améliorer la résistance à la fatigue thermique. Un traitement de surface (comme le polissage ou le revêtement) peut également améliorer la résistance à l'oxydation et les propriétés thermodynamiques. Dans les applications pratiques, le choix de la structure doit être personnalisé en fonction de l'espace disponible dans le four, des exigences de distribution de la température et des contraintes d'installation. Par exemple, le type U convient aux petits fours, tandis que le type W convient aux grands fours pour un chauffage plus uniforme.

3.1.1 Élément chauffant MoSi₂ en forme de U

MoSi₂ en U sont parmi les plus courants et sont largement utilisés dans les fours haute température de petite et moyenne taille, tels que les fours à caisson de laboratoire et les fours de frittage céramique, grâce à leur conception simple et compacte et à leurs performances de chauffage efficaces. La structure de l'élément en U se compose de deux extrémités chaudes parallèles reliées par un coude en U, l'extrémité

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

froide étant située au-dessus de l'extrémité chaude et connectée à l'alimentation électrique. Le principal avantage de la conception en U est que son extrémité chaude peut fournir une zone haute température concentrée, adaptée aux applications nécessitant une densité thermique locale élevée, comme le frittage sous atmosphère oxydante avec une température maximale de 1800 °C. La longueur de l'extrémité chaude de l'élément en U est généralement de 100 à 500 mm, et la longueur spécifique est personnalisée en fonction de la taille du four et des besoins en puissance. Le diamètre de l'extrémité chaude est de 6 à 9 mm et celui de l'extrémité froide de 12 à 18 mm afin de garantir une faible résistance et une transmission efficace du courant.

Les performances thermodynamiques de l'élément en U bénéficient de sa géométrie compacte. La distance entre les extrémités chaudes (généralement de 20 à 50 mm) optimise l'uniformité de la température et réduit la concentration des contraintes thermiques. Le rayon de courbure de la structure en U doit être conçu avec précision. Un rayon trop petit peut entraîner une concentration des contraintes et augmenter le risque de fissures par choc thermique, tandis qu'un rayon trop grand peut réduire l'efficacité de chauffage. La résistivité à coefficient de température positif du MoSi₂ (environ $2,0 \times 10^{-5}$ à température ambiante) $\Omega \cdot \text{cm}$, environ $4,5 \times 10^{-5}$ à 1 500 °C $\Omega \cdot \text{cm}$) permet à l'élément en U d'ajuster automatiquement sa puissance à haute température, ce qui le rend idéal pour les applications de contrôle précis de la température. Cependant, les éléments en U peuvent produire des microfissures en raison de l'accumulation de contraintes à la jonction entre l'extrémité chaude et l'extrémité froide lors de cycles thermiques fréquents, en particulier dans le MoSi₂, qui présente une fragilité importante à basse température (la ténacité à la rupture est d'environ 2 à 3 MPa·m^{1/2}). Pour améliorer la résistance aux chocs thermiques et la durée de vie des éléments en U, les procédés de pressage à chaud et de frittage peuvent augmenter la densité du matériau, et les revêtements de surface (tels que SiC ou Al₂O₃) peuvent améliorer la résistance à l'oxydation et à la fatigue thermique.

Lors de l'installation, les éléments en U sont généralement suspendus verticalement, et l'extrémité froide est fixée par une pince en céramique afin de réduire les contraintes mécaniques. Lors de l'installation, il est nécessaire de s'assurer que l'extrémité froide est bien en contact avec l'alimentation électrique afin d'éviter toute surchauffe locale. En pratique, les éléments en U doivent éviter de dépasser rapidement la plage de températures de « peste » de 400 à 700 °C afin d'éviter la formation d'oxydes non protecteurs (un mélange de MoO₃ et de SiO₂) responsables du poudrage de surface. L'entretien des éléments en U comprend l'inspection régulière de l'intégrité des coudes et des points de connexion, ainsi que la surveillance de l'état du film protecteur de SiO₂ afin de garantir sa stabilité à long terme en atmosphère oxydante.

3.1.2 Élément chauffant MoSi₂ de type W

MoSi₂ de type W sont largement utilisés dans les grands fours à haute température ou dans les applications nécessitant des champs de température uniformes, tels que les fours de fusion du verre, les fours industriels de frittage de céramique et les équipements de traitement thermique des métaux, en raison de leur géométrie complexe et de leur grande surface de chauffe. La structure de l'élément de type W est constituée de plusieurs extrémités chaudes parallèles reliées par des coudes continus en W, contenant généralement trois extrémités chaudes ou plus. Les extrémités froides sont situées de chaque

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

côté ou sur le dessus et connectées à l'alimentation électrique. Son principal avantage est de pouvoir couvrir une plus grande surface de four et d'assurer une distribution de température plus uniforme, ce qui est adapté aux grands fours ou aux besoins de chauffage multizones. La longueur de l'extrémité chaude de l'élément de type W est généralement de 200 à 1 000 mm, son diamètre de 6 à 12 mm et son diamètre de l'extrémité froide de 12 à 24 mm. La taille spécifique est personnalisée en fonction de la puissance requise et de la conception du four. La densité de puissance de chauffage est généralement de 15 à 20 W/cm² (à 1700°C), ce qui peut répondre aux exigences de puissance de sortie élevée tout en maintenant l'uniformité de la température.

Les performances thermodynamiques de l'élément de type W bénéficient de sa conception multi-extrémités chaudes. L'espacement entre les différentes extrémités chaudes (généralement de 30 à 60 mm) permet d'optimiser la répartition du rayonnement thermique et de réduire la surchauffe locale et la concentration des contraintes thermiques. Le rayon de courbure de la structure de type W doit être contrôlé avec précision. Un rayon trop petit peut entraîner une concentration des contraintes et augmenter le risque de fissuration par choc thermique, tandis qu'un rayon trop grand peut réduire l'efficacité de chauffage. La résistivité à coefficient de température positif (CTP) du MoSi₂ permet à l'élément de type W d'ajuster la puissance de manière adaptative à haute température afin de garantir un contrôle et une stabilité précis de la température. Cependant, l'élément de type W peut produire des microfissures dues à l'accumulation de contraintes aux multiples courbures et aux points de connexion extrémité chaude-extrémité froide lors de cycles thermiques fréquents, en particulier lorsque la fragilité à basse température du MoSi₂ est importante (ténacité à la rupture d'environ 2 à 3 MPa·m^{1/2}). Le procédé de frittage par pressage à chaud permet d'augmenter la densité du matériau (près de plus de 98 % de la densité théorique), de réduire les micro-défauts et d'améliorer la résistance à la fatigue thermique. Les revêtements de surface (tels que SiC ou Al₂O₃) peuvent encore améliorer la résistance à l'oxydation et aux chocs thermiques, prolongeant ainsi la durée de vie des composants dans des atmosphères oxydantes à haute température (jusqu'à 1800-1850 °C).

En termes d'installation, les composants de type W sont généralement suspendus verticalement ou supportés horizontalement, l'extrémité froide étant fixée par une pince ou un support en céramique haute pureté afin de réduire les contraintes mécaniques et de permettre la dilatation thermique. Lors de l'installation, il est nécessaire de s'assurer que l'extrémité froide est bien en contact avec l'alimentation afin d'éviter une surchauffe locale due à la résistance de contact. La forme complexe du composant de type W exige une précision d'installation accrue, notamment la disposition symétrique de chaque extrémité chaude afin de maintenir une distribution uniforme du courant. Dans les applications pratiques, il est nécessaire d'éviter de franchir rapidement la plage de températures de « peste » de 400 à 700 °C afin d'éviter la formation d'oxydes non protecteurs (un mélange de MoO₃ et de SiO₂) responsables du poudrage de surface. L'entretien des composants de type W nécessite une inspection régulière de l'intégrité des coudes, des points de connexion et du film protecteur de SiO₂ en surface afin de garantir leur stabilité à long terme en atmosphère oxydante. La maintenance des composants de type W comprend également la surveillance de la température de l'extrémité froide (généralement maintenue en dessous de 400 °C) pour éviter qu'une surchauffe ne provoque une dégradation des points de connexion.

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

Pour optimiser les performances des éléments de type W, il est possible de répondre aux exigences de répartition de température d'un type de four spécifique en augmentant le nombre d'extrémités chaudes ou en ajustant leur espacement dès la conception. Par exemple, dans un grand four de fusion de verre, un élément de type W à extrémités chaudes multiples permet d'obtenir un chauffage uniforme sur une large zone. Le polissage ou le revêtement de surface peut réduire les défauts de surface et améliorer la résistance aux chocs thermiques et à l'oxydation. Dans la pratique, l'installation des éléments de type W doit tenir compte de la dynamique du flux thermique du four et être judicieusement disposée afin d'éviter toute concentration de chaleur ou un apport de chaleur insuffisant. Un nettoyage régulier de l'intérieur du four pour éviter la contamination de la surface par des impuretés est également une mesure importante pour prolonger la durée de vie de l'élément de type W. La structure complexe de l'élément de type W lui confère un avantage significatif pour une utilisation dans les grands fours industriels, mais elle impose également des exigences plus élevées en matière de précision de fabrication et de technologie d'installation.

3.1.3 Élément chauffant en spirale MoSi₂

L'élément chauffant spiralé en MoSi₂ présente une structure spéciale adaptée aux applications nécessitant une densité thermique élevée et une surface de chauffage compacte, telles que les petits fours tubulaires de laboratoire, les équipements d'analyse thermique ou les fours industriels spécifiques. Sa structure est constituée d'une tige de MoSi₂ enroulée autour d'une extrémité chaude spiralée, et d'une extrémité froide située aux deux extrémités de la spirale pour le raccordement à l'alimentation électrique. Son principal avantage est de pouvoir fournir une puissance thermique élevée dans un espace restreint. La forme spiralée augmente la surface de l'extrémité chaude et améliore l'efficacité du rayonnement thermique, ce qui est idéal pour les applications nécessitant un chauffage rapide et un contrôle précis de la température. Le diamètre de l'extrémité chaude de l'élément spiralé est généralement de 4 à 9 mm, et le nombre de spires et le pas (généralement de 5 à 20 mm) sont conçus en fonction de la taille du four et des besoins en puissance. Le diamètre de l'extrémité froide est de 8 à 18 mm pour garantir une faible résistance et une transmission efficace du courant. La densité de puissance de chauffage peut atteindre 20-25 W/cm² (à 1700°C), ce qui est supérieur à celui des types U et W, et convient aux scénarios de chauffage local à haute température.

Les performances thermodynamiques des éléments spiralés sont dues à leur grande surface spécifique et à leur conception compacte. La structure spiralée permet un rayonnement thermique uniforme et réduit les gradients de température, ce qui est adapté aux besoins de chauffage cylindrique des fours tubulaires. Cependant, la géométrie complexe de la spirale augmente la difficulté de fabrication. La courbure et le pas de la spirale doivent être contrôlés avec précision. Une spirale trop serrée peut entraîner une concentration de contraintes thermiques et augmenter le risque de fissures, en particulier dans la phase fragile à basse température du MoSi₂ (ténacité à la rupture d'environ 2 à 3 MPa·m^{1/2}). La résistivité à coefficient de température positif du MoSi₂ permet aux éléments spiralés d'ajuster leur puissance de manière adaptative à haute température afin de garantir la précision du contrôle de la température. Pour améliorer la résistance aux chocs thermiques et la durée de vie, le procédé de frittage par pressage à chaud permet d'augmenter la densité du matériau (près de plus de 98 % de la densité théorique) et de réduire les micro-défauts. Les revêtements de surface (tels que SiC ou Al₂O₃, avec des coefficients de

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

dilatation thermique d'environ $4,5 \times 10^{-6} \text{K}^{-1}$ et $8 \times 10^{-6} \text{K}^{-1}$, respectivement) peuvent améliorer la résistance à l'oxydation et la résistance à la fatigue thermique, prolongeant ainsi la durée de vie des composants dans des atmosphères oxydantes à haute température (jusqu'à 1800°C).

Lors de l'installation, les éléments spiralés sont généralement fixés horizontalement ou verticalement, l'extrémité froide étant fixée par un support en céramique de haute pureté. Il est nécessaire de veiller à ce que la partie spiralée ne soit pas contrainte mécaniquement pour permettre la dilatation thermique. Une attention particulière doit être portée à l'uniformité de la structure spiralée lors de l'installation afin d'éviter toute déformation ou fissure due aux contraintes de montage. Dans la pratique, il est nécessaire de franchir rapidement la plage de températures de « peste » de 400 à 700°C afin d'éviter la formation d'oxydes non protecteurs (un mélange de MoO_3 et de SiO_2) et le poudrage de la surface. L'entretien des éléments spiralés nécessite une inspection régulière du pas de la spirale, des points de connexion de l'extrémité froide et de l'intégrité du film protecteur de SiO_2 en surface afin de garantir sa stabilité en atmosphère oxydante. En raison de leur coût de fabrication élevé et des exigences strictes en matière de précision d'installation, les éléments spiralés sont principalement utilisés dans les équipements de laboratoire de haute précision ou les fours industriels spéciaux.

3.1.4 Élément chauffant MoSi_2 de type tige droite

L'élément chauffant MoSi_2 à tige droite présente une structure simple et linéaire, adaptée aux fours nécessitant un chauffage linéaire longue distance, tels que les fours tunnels, les fours de traitement thermique continu ou certains grands fours industriels. Il se compose d'une seule extrémité chaude droite, l'extrémité froide étant située aux deux extrémités ou à une extrémité pour le raccordement à l'alimentation électrique. Ses principaux avantages sont sa structure simple, son faible coût de fabrication, sa facilité de production et d'installation à grande échelle, et sa capacité à couvrir des zones de chauffage longue distance. La longueur de l'extrémité chaude de l'élément à tige droite est généralement de 300 à $2\,000 \text{ mm}$, son diamètre de 6 à 12 mm et son diamètre de l'extrémité froide de 12 à 24 mm . La taille spécifique est personnalisée en fonction de la longueur du four et des besoins en puissance. La densité de puissance de chauffage est généralement de 15 à 18 W/cm^2 (à $1\,700^\circ \text{C}$), ce qui convient aux applications de chauffage uniforme à densité de puissance moyenne à faible.

Les performances thermodynamiques des éléments à tige droite sont limitées par leur conception linéaire. La répartition de la température sur toute la longueur de l'extrémité chaude peut ne pas être aussi uniforme que celle des éléments de type U ou W. En particulier, lors d'un chauffage sur une longue distance, un phénomène de température élevée au milieu et de température basse aux deux extrémités peut se produire. Pour améliorer l'uniformité de la température, la répartition de la résistance peut être optimisée en ajustant le diamètre de l'extrémité chaude ou en utilisant un dopage segmenté. Français La résistivité à coefficient de température positif du MoSi_2 (environ $2,0 \times 10^{-5}$ à température ambiante) $\Omega \cdot \text{cm}$, environ $4,5 \times 10^{-5}$ à 1500°C $\Omega \cdot \text{cm}$) permet aux composants de type tige droite d'ajuster de manière adaptative la puissance à haute température, mais leur structure linéaire peut produire des microfissures en raison de la concentration de contraintes aux deux extrémités de l'extrémité chaude lors de cycles thermiques fréquents, en particulier lorsque la fragilité à basse température du MoSi_2 est importante (ténacité à la rupture d'environ $2-3 \text{ MPa} \cdot \text{m}^{1/2}$). Le processus de frittage par pressage à chaud peut augmenter la densité

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

du matériau, réduire les microdéfauts et améliorer la résistance aux chocs thermiques et à la fatigue thermique. Les revêtements de surface (tels que SiC ou Al_2O_3) peuvent encore améliorer la résistance à l'oxydation et la stabilité de surface, prolongeant ainsi la durée de vie des composants dans des atmosphères oxydantes à haute température (jusqu'à 1800°C).

Lors de l'installation, les éléments à tige droite sont généralement supportés horizontalement ou suspendus verticalement, et l'extrémité froide est fixée par une pince en céramique de haute pureté. Il est nécessaire de veiller à une répartition uniforme des points d'appui afin d'éviter tout affaissement ou rupture de l'élément. Lors de l'installation, une attention particulière doit être portée à la qualité du contact entre l'extrémité froide et l'alimentation électrique afin d'éviter toute surchauffe locale due à la résistance de contact. En pratique, il est nécessaire de franchir rapidement la plage de températures de « peste » de 400 à 700°C afin d'éviter la formation d'oxydes non protecteurs et le poudrage de la surface. Pour entretenir les éléments à tige droite, il est nécessaire de vérifier régulièrement l'intégrité de la surface de l'extrémité chaude, du point de connexion de l'extrémité froide et du film protecteur de SiO_2 , et de surveiller la température de l'extrémité froide (généralement maintenue en dessous de 400°C) afin d'éviter toute surchauffe et dégradation. En raison de la structure simple des éléments de type tige droite, leurs coûts de fabrication et de maintenance sont faibles, mais les exigences d'uniformité de température sont élevées et la disposition doit être optimisée en combinaison avec la conception du four.

3.1.5 Comparaison des conceptions structurelles en U, en W et droites

MoSi_2 en forme de U, de W et de tige droite sont les structures les plus courantes parmi les éléments chauffants MoSi_2 . Chacun possède ses propres caractéristiques, adaptées à différents types de fours et applications. Les éléments en U sont réputés pour leur compacité et leur capacité de chauffage centralisée. La longueur de l'extrémité chaude est généralement de 100 à 500 mm, son diamètre de 6 à 9 mm et sa densité de puissance peut atteindre 20 W/cm^2 (à 1700°C). Ils conviennent aux fours de petite et moyenne taille (tels que les fours à caisson de laboratoire et les fours de frittage céramique) qui nécessitent une densité de chaleur locale élevée. Leurs avantages sont une structure simple, une installation facile et un rendement thermique élevé. Cependant, l'extrémité chaude couvre une surface réduite et l'uniformité de la température est limitée par l'espacement entre les extrémités chaudes (généralement de 20 à 50 mm). Des microfissures sont susceptibles de se produire à la jonction entre l'extrémité chaude et l'extrémité froide lors de cycles thermiques fréquents. Les éléments en W offrent une plus grande surface de chauffage grâce à leur conception à extrémités chaudes multiples. La longueur de l'extrémité chaude est de 200 à $1\,000$ mm, son diamètre de 6 à 12 mm et sa densité de puissance de 15 à 20 W/cm^2 . Elles conviennent aux grands fours (tels que les fours de fusion du verre et les fours industriels de frittage de céramique) qui nécessitent un champ de température uniforme. Leurs avantages sont une distribution de température plus uniforme et une forte résistance aux contraintes thermiques, mais leur fabrication est complexe et coûteuse, et les courbures multiples augmentent le risque de fissures dues aux chocs thermiques. Les éléments de type tige droite sont connus pour leur structure linéaire, avec une longueur d'extrémité chaude de 300 à $2\,000$ mm, un diamètre de 6 à 12 mm et une densité de puissance de 15 à 18 W/cm^2 , ce qui les rend adaptés aux fours tunnels ou aux fours de traitement thermique continu à chauffage linéaire longue distance. Leurs avantages sont un faible coût de fabrication et une installation

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

simple, mais leur faible uniformité de température et la facilité de formation de fissures aux deux extrémités de l'extrémité chaude en raison de la concentration des contraintes.

Français Du point de vue des propriétés thermodynamiques, la conductivité thermique (environ 45 W/(m·K) à température ambiante et environ 15 W/(m·K) à 1500°C) et le coefficient de dilatation thermique (environ $8,1 \times 10^{-6} \text{ K}^{-1}$) des trois structures sont similaires, mais la forme géométrique affecte la distribution des contraintes thermiques. La conception en flexion des types U et W peut disperser les contraintes thermiques, et la résistance aux chocs thermiques est meilleure que celle du type à tige droite, mais le type à tige droite a une stabilité mécanique plus élevée en raison de l'absence de points de concentration des contraintes de flexion lors du chauffage à longue distance.

Français En termes de résistance à l'oxydation, les trois structures reposent sur le film protecteur de surface SiO_2 (le coefficient de diffusion de l'oxygène est d'environ $10^{-13} \text{ cm}^2/\text{s}$ à 1500°C), mais le type W a une plus grande surface, et la formation et le maintien du film SiO_2 sont plus uniformes, et la résistance à l'oxydation est légèrement meilleure. Le type à tige droite peut provoquer une dégradation locale du film SiO_2 en raison d'une température inégale lors d'un chauffage à longue distance. En termes de performances en cyclage thermique, les types U et W sont sujets aux microfissures lors de cycles thermiques fréquents en raison de leur géométrie complexe, tandis que le type à tige droite est plus résistant à la fatigue thermique en raison de sa structure simple, mais la distribution de température doit être optimisée.

En termes d'installation et de maintenance, les éléments en U conviennent à une suspension verticale. Leur installation est simple, mais il convient de prêter attention au contact avec l'extrémité froide. Les éléments en W nécessitent une installation précise et symétrique, et leur maintenance est complexe, mais ils conviennent aux grands fours. Les tiges droites sont flexibles à installer, mais doivent être soutenues uniformément pour éviter tout affaissement. Le procédé de fabrication a des effets similaires sur les trois structures. Le pressage à chaud et le frittage peuvent améliorer la densité (près de 98 %), tandis que les revêtements de surface (tels que SiC ou Al_2O_3) peuvent améliorer la résistance à l'oxydation et aux chocs thermiques. Lors du choix, le type U convient aux petits fours de haute précision, le type W aux grands fours à chauffage uniforme, et le type à tige droite au chauffage linéaire longue distance. Ce choix doit être étudié en détail en fonction de la conception du four, des besoins en énergie et de la fréquence des cycles thermiques.

3.2 Conception dimensionnelle des éléments chauffants en MoSi_2

En disiliciure de molybdène (MoSi_2) sont essentiels à l'optimisation de leurs performances, ce qui affecte directement l'efficacité de chauffage, la répartition de la température, la résistance aux chocs thermiques et la durée de vie. La taille des éléments chauffants en MoSi_2 est généralement déterminée par le diamètre et la longueur des extrémités chaude et froide, ainsi que par le rapport entre les extrémités chaude et froide. Les spécifications courantes incluent $\Phi 6/12$ (diamètre de l'extrémité chaude : 6 mm, diamètre de l'extrémité froide : 12 mm) et $\Phi 9/18$ (diamètre de l'extrémité chaude : 9 mm, diamètre de l'extrémité froide : 18 mm). Ces dimensions doivent être déterminées en fonction de la taille du four, des besoins en énergie, de la fréquence des cycles thermiques et du mode d'installation afin de garantir un

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

chauffage efficace et une stabilité à long terme en atmosphère oxydante à haute température. La spécification $\Phi 6/12$ convient aux fours de petite et moyenne taille (tels que les fours de laboratoire et les fours de frittage céramique). Son diamètre d'extrémité chaude est réduit et sa densité de puissance élevée, ce qui le rend adapté aux applications nécessitant un chauffage rapide et centralisé. La spécification $\Phi 9/18$ est adaptée aux grands fours (tels que les fours de fusion du verre et les fours de traitement thermique industriels). Son diamètre d'extrémité chaude plus important et sa densité de puissance légèrement inférieure (généralement $15\text{-}20\text{ W/cm}^2$) offrent une répartition de température plus uniforme et une résistance mécanique supérieure, et conviennent aux applications de chauffage de grandes surfaces ou à forte charge.

L'objectif principal de la conception dimensionnelle est d'équilibrer les propriétés électrothermiques et mécaniques de l'extrémité chaude et de l'extrémité froide. Le diamètre de l'extrémité chaude détermine la résistance et la puissance de chauffe. Les extrémités chaudes plus petites (par exemple, 6 mm) ont une résistance plus élevée et conviennent aux applications à forte densité de puissance, mais présentent une résistance aux chocs thermiques et une résistance mécanique plus faibles. Les extrémités chaudes plus grandes (par exemple, 9 mm) ont une résistance plus faible et une densité de puissance modérée, mais une meilleure résistance aux chocs thermiques et une meilleure durée de vie. Le diamètre de l'extrémité froide est généralement 1,5 à 2 fois supérieur à celui de l'extrémité chaude (par exemple, $\Phi 6/12$ ou $\Phi 9/18$), et la résistivité est réduite par dopage avec des matériaux hautement conducteurs (comme l'aluminium ou le tungstène) (environ $0,5 \times 10^{-5}\text{ }\Omega\cdot\text{cm}$, à température ambiante), afin de garantir que la température de l'extrémité froide reste inférieure à $400\text{ }^\circ\text{C}$ et d'éviter toute surchauffe et dégradation. La longueur de l'extrémité chaude (généralement de 100 à 1 000 mm) doit être personnalisée en fonction de la profondeur du four et de la zone de chauffe. Une longueur trop courte peut entraîner une concentration de chaleur, tandis qu'une longueur trop longue peut entraîner une température inégale. La longueur de l'extrémité froide (généralement de 50 à 300 mm) doit être suffisante pour traverser la paroi du four afin d'assurer une connexion stable à l'alimentation électrique et d'éviter la conduction thermique de l'extrémité chaude vers l'extrémité froide.

La conception dimensionnelle doit également tenir compte des propriétés thermodynamiques du MoSi_2 . Sa conductivité thermique (environ $45\text{ W/(m}\cdot\text{K)}$ à température ambiante et environ $15\text{ W/(m}\cdot\text{K)}$ à $1\,500\text{ }^\circ\text{C}$) et son coefficient de dilatation thermique (environ $8,1 \times 10^{-6}\text{ K}^{-1}$, de la température ambiante à $1\,000\text{ }^\circ\text{C}$) affectent la répartition des contraintes thermiques. Les extrémités chaudes de plus petit diamètre (par exemple 6 mm) sont sujettes à une concentration de contraintes thermiques lors de cycles thermiques rapides, ce qui entraîne des microfissures, en particulier dans la phase fragile à basse température du MoSi_2 (la ténacité à la rupture est d'environ $2\text{ à }3\text{ MPa}\cdot\text{m}^{1/2}$). Les extrémités chaudes de plus grand diamètre (par exemple 9 mm) peuvent mieux disperser les contraintes thermiques et améliorer la résistance aux chocs thermiques. Le processus de préparation est crucial pour la précision dimensionnelle. Le pressage à chaud et le frittage permettent d'assurer une densité des composants (proche de 98 %) et une uniformité dimensionnelle, tout en réduisant les micro-défauts. Les revêtements de surface (tels que SiC ou Al_2O_3) peuvent améliorer la résistance à l'oxydation et à la fatigue thermique, et accroître la fiabilité de la conception dimensionnelle. Dans les applications pratiques, le choix de la taille doit être optimisé en fonction du type de four et des conditions de fonctionnement. Par exemple, $\Phi 6/12$ convient aux fours de laboratoire de haute précision, et $\Phi 9/18$ aux grands fours industriels. Il est

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

nécessaire d'éviter de dépasser rapidement la plage de températures critique de 400 à 700 °C afin d'éviter le poudrage en surface.

3.3 Conception optimale du champ thermique et de la structure de l'extrémité froide

L'optimisation du champ thermique et de la structure de l'extrémité froide des éléments chauffants en MoSi₂ est essentielle pour un chauffage efficace, une répartition uniforme de la température et une longue durée de vie. La conception du champ thermique vise à garantir que la répartition de la température dans le four réponde aux exigences du procédé (telles qu'une précision de ± 5 °C pour le frittage céramique), ce qui est obtenu en optimisant la disposition, la forme et la densité de puissance de l'extrémité chaude. La conductivité thermique du MoSi₂ (environ 15 W/(m·K) à 1 500 °C) et la résistivité à coefficient de température positif (environ $4,5 \times 10^{-5}$ à 1 500 °C) sont très élevées. $\Omega \cdot \text{cm}$) nécessite une conception du champ thermique adaptée au nombre et à l'espacement des extrémités chaudes. Par exemple, l'espacement des extrémités chaudes des éléments en U (20-50 mm) convient au chauffage centralisé des petits fours, tandis que l'espacement multiple des extrémités chaudes des éléments en W (30-60 mm) convient au chauffage uniforme des grands fours. L'optimisation du champ thermique doit également prendre en compte le rayonnement thermique et la convection. La surface et la disposition des extrémités chaudes (par exemple, une disposition symétrique) affectent directement la distribution de la chaleur. L'augmentation du nombre d'extrémités chaudes ou l'utilisation d'éléments en spirale peut améliorer l'uniformité du champ thermique, mais augmente la complexité de fabrication. La densité de puissance doit être modérée (15-25 W/cm² à 1700 °C). Une densité de puissance trop élevée peut provoquer une surchauffe locale et réduire la stabilité du film protecteur de SiO₂.

L'optimisation de la structure de l'extrémité froide vise à réduire sa température (généralement ≤ 400 °C) et à améliorer la stabilité des connexions électriques ainsi que la durée de vie des composants. L'extrémité froide est dopée avec des matériaux hautement conducteurs (comme l'aluminium) afin de réduire sa résistivité (environ $0,5 \times 10^{-5} \Omega \cdot \text{cm}$) et de limiter la production de chaleur. Son diamètre (12-24 mm) est 1,5 à 2 fois supérieur à celui de l'extrémité chaude afin d'améliorer la dissipation thermique. La longueur de l'extrémité froide (50-300 mm) doit être suffisante pour traverser la paroi du four, pénétrer dans la zone basse température et se connecter à l'alimentation électrique, mais une longueur excessive peut augmenter le coût des matériaux. La connexion entre l'extrémité froide et l'extrémité chaude est un point de concentration des contraintes ; un dopage progressif ou une technologie de soudage (comme le soudage plasma) est nécessaire pour assurer une transition en douceur et réduire les contraintes thermiques et les microfissures. La surface de l'extrémité froide est souvent recouverte d'un revêtement conducteur (comme une couche aluminisée) pour améliorer la conductivité de contact et prévenir l'oxydation. L'optimisation de la conception de l'extrémité froide nécessite également de prendre en compte l'environnement de dissipation thermique, comme la réduction de la température de l'extrémité froide grâce à un manchon isolant en céramique ou à la convection d'air pour éviter la surchauffe et la détérioration du point de connexion.

L'optimisation coordonnée de la structure du champ chaud et de la partie froide doit être combinée à la conception du four et aux conditions de fonctionnement. La simulation du champ thermique (comme l'analyse par éléments finis) permet de prédire la distribution de température et de guider la configuration

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

de la partie chaude et la répartition de la puissance. La conception de la dissipation thermique de la partie froide doit être adaptée aux matériaux d'étanchéité et d'isolation des parois du four (comme la fibre d'alumine) afin de garantir la stabilité de la température de la partie froide. La fragilité à basse température du MoSi₂ (ténacité à la rupture d'environ 2 à 3 MPa·m^{1/2}) nécessite une conception optimisée pour éviter les cycles thermiques rapides dans la plage de « peste » de 400 à 700 °C et empêcher la formation d'oxydes non protecteurs. Les revêtements de surface (comme le SiC, avec un coefficient de dilatation thermique d'environ $4,5 \times 10^{-6} \text{ K}^{-1}$) peuvent améliorer la résistance à l'oxydation de la partie chaude et à la corrosion de la partie froide. Dans les applications pratiques, l'inspection régulière de l'uniformité du champ thermique et de l'état de connexion de l'extrémité froide, ainsi que le réglage de la vitesse de chauffage et de refroidissement (5-10°C/min) peuvent garantir la stabilité à long terme du champ chaud et de la structure de l'extrémité froide, et répondre aux applications à forte demande telles que le traitement thermique des semi-conducteurs et la fusion du verre.

3.4 Conception du système de connexion et de support électrique

La conception du système de connexion et de support électrique des éléments chauffants en MoSi₂ est essentielle à leur stabilité opérationnelle, à leur efficacité de chauffage et à leur durée de vie. Le système de connexion électrique doit assurer un contact à faible résistance entre l'extrémité froide et l'alimentation afin d'éviter toute surchauffe locale et toute perte de puissance. Parallèlement, le système de support doit assurer un maintien mécanique, permettre la dilatation thermique et réduire les contraintes thermiques et les risques de fissures. La résistivité de l'extrémité froide du MoSi₂ (environ $0,5 \times 10^{-5} \Omega \cdot \text{cm}$, à température ambiante) est bien inférieure à celle de l'extrémité chaude ($2,0 \times 10^{-5} \Omega \cdot \text{cm}$), et la conductivité est optimisée par aluminisation ou dopage avec des matériaux hautement conducteurs (comme le tungstène). Les connexions électriques utilisent généralement une pince hautement conductrice (comme du cuivre ou un alliage d'aluminium) pour fixer l'extrémité froide. La surface de la pince doit être nickelée ou argentée pour éviter l'oxydation et garantir une résistance de contact inférieure à 0,01 Ω. Une force de serrage appropriée (généralement de 5 à 10 N/cm²) doit être appliquée au point de connexion. Un serrage trop serré peut provoquer une rupture fragile du MoSi₂ (ténacité à la rupture d'environ 2 à 3 MPa·m^{1/2}), tandis qu'un serrage trop lâche peut provoquer un arc électrique ou une surchauffe.

La conception de la connexion électrique doit également tenir compte du type d'alimentation et du système de contrôle. Les composants MoSi₂ conviennent aux alimentations à commande proportionnelle ou à déclenchement par phase et doivent être équipés d'une fonction de limitation de courant (densité de courant maximale $\leq 10 \text{ A/mm}^2$) afin d'éviter toute commutation non proportionnelle ou tout endommagement soudain des composants. Les régulateurs de tension et les transformateurs peuvent stabiliser l'entrée (généralement 20-100 V) et s'adapter à la variation de résistivité du coefficient de température positif du MoSi₂ (environ $4,5 \times 10^{-5}$ à $1 \text{ 500 } ^\circ\text{C}$). Ω·cm). La connexion de l'extrémité froide doit être équipée d'un dispositif de dissipation thermique (tel qu'un refroidissement par air ou par eau) pour maintenir la température de l'extrémité froide $\leq 400 \text{ } ^\circ\text{C}$ et éviter ainsi la détérioration du point de connexion. Le câble doit être résistant aux hautes températures (par exemple, un câble en alliage à base de nickel) et adapté à la taille de l'extrémité froide afin d'éviter une résistance de contact excessive. Pour

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

améliorer la fiabilité de la connexion, une pâte conductrice ou un joint en feuille d'aluminium peut être utilisé pour améliorer la conductivité du contact.

La conception du système de support doit garantir la stabilité mécanique et la liberté de dilatation thermique des éléments MoSi_2 . Les matériaux de support courants sont l'alumine de haute pureté ou l'oxyde de zirconium (ZrO_2), qui correspondent au coefficient de dilatation thermique du MoSi_2 ($8,1 \times 10^{-6} \text{ K}^{-1}$) afin de réduire les contraintes thermiques. Les formes de support comprennent des pinces, des crochets de suspension et des poutres de support. La suspension verticale convient aux éléments en U et en W, tandis que le support horizontal convient aux éléments à tige droite. Le support doit être conçu comme une structure flexible pour permettre au MoSi_2 de se dilater à haute température (environ 0,8 % de dilatation linéaire à 1 500 °C) afin d'éviter la concentration des contraintes. La surface du support doit être lisse pour éviter l'usure du film protecteur de SiO_2 à la surface du MoSi_2 . Le système de support doit également être coordonné avec le matériau d'isolation du four (comme la fibre d'alumine) pour garantir que l'extrémité chaude est exposée à la zone de chauffage et que l'extrémité froide est située dans la zone de basse température.

La conception coordonnée du système de connexion électrique et de support doit tenir compte de l'environnement d'exploitation et de la fréquence des cycles thermiques. Un passage rapide dans la plage de températures extrêmes de 400 à 700 °C permet d'éviter la formation d'oxydes non protecteurs et de protéger les points de connexion et les surfaces du support. La vérification régulière de l'état de contact de la pince, de l'usure du support et de la température de l'extrémité froide, le nettoyage des oxydes des points de connexion et l'ajustement de la force de serrage peuvent prolonger la durée de vie du système. Les revêtements de surface (tels que SiC ou Al_2O_3) peuvent améliorer la résistance à la corrosion de l'extrémité froide et la durabilité du support. Dans les applications réelles, le système de connexion électrique et de support doit être personnalisé en fonction du type de four (four tubulaire, four à caisson) et de l'application (frittage de céramique, traitement thermique des métaux) afin de garantir le fonctionnement stable de l'élément chauffant en MoSi_2 dans une atmosphère oxydante à haute température.

3.5 Structure du terminal et méthode de connexion

La structure des bornes et le mode de connexion de l'élément chauffant en disiliciure de molybdène (MoSi_2) ont un impact majeur sur ses performances électriques, sa stabilité mécanique et sa durée de vie. La borne désigne généralement l'extrémité froide, responsable de la connexion au réseau électrique. Elle doit assurer un contact à faible résistance, une conductivité élevée et une résistance à la corrosion à haute température, tout en supportant la dilatation thermique et les contraintes mécaniques. La résistivité de l'extrémité froide en MoSi_2 (environ $0,5 \times 10^{-5}$ à température ambiante) $\Omega \cdot \text{cm}$) est nettement inférieure à celle de l'extrémité chaude (environ $2,0 \times 10^{-5}$ à température ambiante) grâce au dopage avec des matériaux hautement conducteurs. $\Omega \cdot \text{cm}$), et son diamètre est généralement 1,5 à 2 fois supérieur à celui de l'extrémité chaude (spécifications $\Phi 6/12$ ou $\Phi 9/18$, par exemple) afin de réduire la production de chaleur et de maintenir la température de l'extrémité froide en dessous de 400 °C. La conception de la structure d'extrémité doit optimiser la zone de transition entre l'extrémité froide et l'extrémité chaude afin de réduire la concentration de contraintes et d'empêcher l'apparition de microfissures, en particulier

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

dans la phase fragile à basse température du MoSi_2 (ténacité à la rupture d'environ $2 \text{ à } 3 \text{ MPa} \cdot \text{m}^{1/2}$). Les structures d'extrémité courantes comprennent des transitions droites, courbes et coniques. Les extrémités froides droites conviennent aux éléments en U et aux tiges droites. Les extrémités froides courbes (comme les coudes à 90°) conviennent aux fours en W ou aux fours à espace restreint. La transition conique lisse la connexion entre l'extrémité chaude et l'extrémité froide grâce à une variation progressive du diamètre afin de réduire les contraintes thermiques.

Les méthodes de connexion comprennent principalement le serrage, le soudage et le boulonnage. Le serrage est la méthode la plus courante. Une pince à haute conductivité (comme un alliage de cuivre ou d'aluminium, nickelé ou argenté en surface) est utilisée pour fixer l'extrémité froide. La résistance de contact doit être inférieure à $0,01 \Omega$. La force de serrage doit être modérée ($5\text{-}10 \text{ N/cm}^2$). Un serrage trop serré peut provoquer une rupture fragile du MoSi_2 , tandis qu'un serrage trop lâche peut provoquer un arc électrique ou une surchauffe locale. Pour améliorer la conductivité de contact, un revêtement aluminisé ou une pâte conductrice peut être appliqué sur la surface de l'extrémité froide.

Le soudage relie l'extrémité froide à un joint conducteur (comme un alliage à base de nickel) par soudage plasma ou par résistance. Il convient aux applications de haute précision, mais la température doit être contrôlée pendant le soudage pour éviter la détérioration de l'extrémité chaude. Le boulonnage est adapté aux grands fours industriels. L'extrémité froide est fixée à l'aide de boulons et de joints résistants aux hautes températures. Son installation est facile, mais la résistance de contact est légèrement supérieure. Il est nécessaire de vérifier régulièrement l'état desserré. La méthode de connexion doit être adaptée au système d'alimentation. Il est recommandé d'utiliser des alimentations à commande proportionnelle ou à déclenchement par phase avec fonction de limitation de courant (densité de courant maximale $\leq 10 \text{ A/mm}^2$) pour les composants MoSi_2 afin d'éviter que des commutateurs non proportionnels n'endommagent les composants.

L'optimisation de la structure du terminal et de la méthode de connexion doit tenir compte des cycles thermiques et des facteurs environnementaux. Des cycles thermiques fréquents peuvent entraîner une accumulation de contraintes thermiques au niveau de la connexion de l'extrémité froide, provoquant des microfissures ou une augmentation de la résistance de contact, en particulier dans la plage de températures de « peste » de $400 \text{ à } 700^\circ\text{C}$, où des oxydes non protecteurs (mélanges de MoO_3 et de SiO_2) peuvent corroder les points de connexion. Pour améliorer la durabilité, l'extrémité froide peut être recouverte d'une couche protectrice de SiC ou d' Al_2O_3 (coefficients de dilatation thermique d'environ $4,5 \times 10^{-6} \text{K}^{-1}$ et $8 \times 10^{-6} \text{K}^{-1}$, respectivement) afin d'améliorer la résistance à l'oxydation et à la corrosion. Une conception de dissipation thermique (comme un refroidissement par air ou des manchons isolants en céramique) peut maintenir l'extrémité froide à un faible niveau et prolonger la durée de vie du point de connexion. Dans les applications pratiques, la vérification régulière de l'intégrité de la pince ou du joint de soudure, le nettoyage de l'oxyde et le réglage de la force de serrage permettent de garantir la stabilité à long terme de la connexion des bornes. La conception de la structure d'extrémité et la méthode de connexion doivent également être coordonnées avec le matériau d'isolation du four (comme la fibre d'alumine) et le système de support afin de garantir que l'extrémité froide se situe dans la zone basse température et réponde aux exigences de fiabilité des applications haute température telles que le frittage de céramique et la fusion du verre.

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

3.6 Points clés de la conception de la personnalisation des produits

La conception sur mesure des éléments chauffants en MoSi_2 est essentielle pour répondre aux exigences spécifiques des types de fours et des procédés. Elle implique une optimisation complète de la structure, de la taille, de la modification des matériaux et des conditions de fonctionnement. La conception sur mesure nécessite de déterminer la forme, la densité de puissance, la plage de température et le mode d'installation de l'élément en fonction du scénario d'application (four tubulaire de laboratoire, four industriel de frittage de céramique, four de fusion du verre ou four de traitement thermique des semi-conducteurs) afin d'obtenir un chauffage efficace, un champ de température uniforme et une longue durée de vie. Les propriétés thermodynamiques du MoSi_2 et sa résistivité à coefficient de température positif offrent une grande flexibilité pour une conception sur mesure, mais sa fragilité à basse température exige une prise en compte complète des contraintes thermiques et de la stabilité mécanique. Voici quelques points clés pour une conception sur mesure.

Premièrement, la personnalisation de la structure et des dimensions doit correspondre à la géométrie du four et aux exigences de chauffage. Les éléments en U (diamètre de l'extrémité chaude : 6-9 mm, longueur : 100-500 mm) conviennent au chauffage centralisé des petits fours ; les éléments en W (longueur de l'extrémité chaude : 200-1 000 mm) au chauffage uniforme des grands fours ; les éléments en spirale sont adaptés aux exigences de densité thermique élevée des fours tubulaires ; et les éléments à tige droite conviennent au chauffage linéaire longue distance. Le rapport des diamètres de l'extrémité chaude sur l'extrémité froide (par exemple, $\Phi 6/12$ ou $\Phi 9/18$) doit être optimisé en fonction de la densité de puissance. La longueur et l'espacement des extrémités chaudes doivent être simulés par champ thermique (par exemple, analyse par éléments finis) afin de garantir une température uniforme ($\pm 5^\circ\text{C}$). La longueur de l'extrémité froide (50-300 mm) doit être suffisante pour traverser la paroi du four et pénétrer dans la zone basse température. Les types de fours spéciaux peuvent nécessiter des formes non standard (telles que des types en L ou à coudes multiples), et le rayon de courbure doit être contrôlé avec précision (généralement ≥ 10 mm) pour réduire la concentration de contraintes thermiques.

Deuxièmement, la modification des matériaux et le traitement de surface sont des éléments importants de la conception sur mesure. La pureté du MoSi_2 ($\geq 99,5\%$) affecte directement la résistance à l'oxydation et la conductivité thermique. Des matières premières de haute pureté peuvent réduire l'affaiblissement des joints de grains causé par les impuretés (telles que Fe et Al). La modification du dopage (comme l'ajout de Y_2O_3 ou d' Al_2O_3) peut améliorer la résistance des joints de grains et la résistance aux chocs thermiques, ce qui est adapté aux applications à cycles thermiques fréquents. Les revêtements de surface (tels que SiC ou Al_2O_3) peuvent prolonger la durée de vie des films protecteurs de SiO_2 et améliorer leur résistance à l'oxydation par fléau. L'épaisseur du revêtement (10-50 μm) doit être optimisée en fonction de la température et de l'atmosphère de fonctionnement. Une épaisseur excessive peut provoquer un décollement, tandis qu'une épaisseur trop faible entraînera une protection insuffisante. Le processus de préparation (tel que le pressage à chaud et le frittage) doit garantir une densité (proche de 98 %), réduire les défauts microscopiques et améliorer les propriétés mécaniques et thermodynamiques.

Troisièmement, la personnalisation des conditions de fonctionnement doit tenir compte de la température, de l'atmosphère et de la fréquence des cycles thermiques. La température maximale de fonctionnement

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

des composants MoSi_2 peut atteindre $1\,850\text{ }^\circ\text{C}$ en atmosphère oxydante, mais elle doit être réduite à moins de $1\,500\text{ }^\circ\text{C}$ en environnement réducteur ou sous vide afin d'éviter la défaillance du film de SiO_2 . La conception personnalisée doit préciser le type d'atmosphère (teneur en humidité, teneur en impuretés, etc.). Un environnement très humide peut entraîner l'hydratation du film de SiO_2 et réduire la conductivité thermique. Les applications à fréquences de cycles thermiques élevées (comme le traitement thermique des semi-conducteurs) doivent optimiser les vitesses de chauffage et de refroidissement ($5\text{-}10\text{ }^\circ\text{C/min}$) afin d'éviter un passage rapide à $400\text{-}700\text{ }^\circ\text{C}$. Le système de contrôle de puissance doit être adapté aux caractéristiques de résistance du MoSi_2 , utiliser une alimentation à commande proportionnelle et être équipé d'un régulateur de tension ($20\text{-}100\text{ V}$) et d'une fonction de limitation de courant pour éviter les surcharges.

Enfin, la conception personnalisée pour l'installation et la maintenance doit être coordonnée avec la structure du four. La suspension verticale convient aux éléments en U et en W, le support horizontal aux tiges droites, et le matériau du support (tel que l'alumine, avec un coefficient de dilatation thermique d'environ $8 \times 10^{-6}\text{ K}^{-1}$) doit correspondre au MoSi_2 pour permettre la dilatation thermique (environ $0,8\%$, $1500\text{ }^\circ\text{C}$). Les connexions électriques doivent utiliser des pinces à haute conductivité ou des joints soudés afin de garantir une résistance de contact inférieure à $0,01\ \Omega$. La conception personnalisée doit inclure des consignes de maintenance, notamment des inspections régulières de la température de l'extrémité froide, de l'état du film de SiO_2 et de l'intégrité des points de connexion, ainsi que le nettoyage des impuretés du four (telles que les oxydes de métaux alcalins). Grâce à la simulation du champ thermique, à l'optimisation des matériaux et à l'adaptation aux conditions de fonctionnement, les conceptions personnalisées peuvent répondre aux exigences de performance d'applications spécifiques et prolonger la durée de vie des éléments chauffants en MoSi_2 dans les environnements à haute température.



CTIA GROUP LTD Tige de silicium-molybdène

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

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

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

Chapitre 4 Procédé de fabrication de l'élément chauffant en MoSi₂

4.1 Principes de sélection et de dosage des matières premières

En disiliciure de molybdène (MoSi₂) sont essentielles . Leur qualité influence directement leurs propriétés thermodynamiques, leur résistance à l'oxydation et leur durée de vie. Le MoSi₂ est un composé intermétallique de formule chimique MoSi₂ . Il doit être synthétisé à partir de molybdène (Mo) et de silicium (Si) de haute pureté, généralement préparés sous forme de poudre par métallurgie des poudres. Le principe fondamental de la sélection des matières premières est de garantir une pureté élevée (généralement $\geq 99,5\%$) et une faible teneur en impuretés afin de réduire le risque d'affaiblissement des joints de grains et d'oxydation non protectrice. La poudre de molybdène requiert une pureté $\geq 99,9\%$, et la teneur en impuretés majeures (telles que Fe, Al, C) doit être inférieure à 0,01 %, car Fe et Al peuvent provoquer une corrosion des joints de grains et réduire la résistance aux chocs thermiques ; les impuretés de carbone peuvent générer des carbures et affecter la résistivité. La poudre de silicium doit également être d'une pureté élevée ($\geq 99,9\%$) afin d'éviter les impuretés non métalliques telles que l'oxygène et l'azote, responsables de défauts dans le film protecteur de SiO₂ . La granulométrie est un autre facteur clé. La granulométrie des poudres de molybdène et de silicium est généralement contrôlée entre 1 et 10 μm . Des particules trop grosses peuvent entraîner un frittage irrégulier, tandis que des particules trop petites augmentent le coût de préparation.

Le principe de dosage repose sur le rapport stoechiométrique de MoSi₂ (rapport molaire Mo:Si = 1:2), et le rapport massique théorique molybdène/silicium est d'environ 2,55:1. Pour garantir une réaction complète, la proportion réelle peut légèrement s'écarter du rapport stoechiométrique. Par exemple, la teneur en silicium est augmentée de 0,5 à 1 % pour compenser la perte par volatilisation lors du frittage à haute température. La modification du dopage est un moyen important d'optimiser les performances. Les dopants couramment utilisés comprennent les oxydes de terres rares (tels que Y₂O₃ , La₂O₃ , ajouté en quantité de 0,1 à 1 % en poids, améliore la résistance aux joints de grains et aux chocs thermiques, ou l'alumine améliore la stabilité du film de SiO₂ . Les dopants doivent être d'une pureté élevée ($\geq 99,95\%$) pour éviter l'introduction d'impuretés supplémentaires. Le dosage doit être réalisé sous atmosphère inerte (comme l'argon) ou sous vide pour éviter l'oxydation des matières premières. L'uniformité du mélange est essentielle à la performance finale. Des broyeurs planétaires à boulets ou des mélangeurs en V sont généralement utilisés pour le mélange, et la durée et la vitesse du broyage à boulets sont contrôlées pour éviter la rupture ou la contamination des particules.

Le choix et la proportion des matières premières doivent également tenir compte du procédé de préparation et des exigences de l'application. Par exemple, le frittage par pressage à chaud nécessite des particules plus fines (1 à 5 μm) pour améliorer la densité (proche de 98 %), tandis que la synthèse auto-propagée à haute température (SHS) peut accepter des particules légèrement plus grosses (5 à 10 μm) pour réduire les coûts. Pour les applications de haute précision (comme le traitement thermique des semi-conducteurs), des matières premières d'une pureté ultra-élevée ($\geq 99,99\%$) doivent être sélectionnées et la précision des proportions ($\pm 0,1\%$) doit être strictement contrôlée. Le processus de contrôle qualité comprend l'analyse de la composition chimique (par exemple, ICP-MS) et la détection de la distribution granulométrique (par exemple, par granulomètre laser) afin de garantir que les matières premières

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

répondent aux exigences de conception. Une sélection et un dosage judicieux des matières premières constituent la base du moulage et du frittage ultérieurs, garantissant la stabilité et la fiabilité des éléments chauffants en MoSi_2 dans des atmosphères oxydantes à haute température.

4.2 Métallurgie des poudres et procédé de pressage isostatique

La métallurgie des poudres est le procédé de base pour la fabrication d'éléments chauffants en MoSi_2 . Associée au pressage isostatique, elle permet de produire des éléments haute densité et hautes performances, adaptés aux structures en U, en W, en tige droite et en spirale. Le procédé de métallurgie des poudres comprend quatre étapes principales : le mélange des matières premières, le moulage, le frittage et le post-traitement. Parmi ces étapes, le pressage isostatique est la technologie de moulage clé, garantissant la précision dimensionnelle et l'uniformité microstructurale des éléments. La conductivité thermique (environ $15 \text{ W/(m}\cdot\text{K)}$ à 1500°C), le coefficient de dilatation thermique (environ $8,1 \times 10^{-6} \text{ K}^{-1}$) et la résistance à l'oxydation du MoSi_2 dépendent d'une densité élevée ($\geq 98\%$) et d'un faible taux de défauts. L'association de la métallurgie des poudres et du pressage isostatique permet de répondre efficacement à ces exigences.

Mélange des matières premières : Le procédé de mélange consiste à mélanger uniformément de la poudre de molybdène de haute pureté et de la poudre de silicium selon un rapport stœchiométrique ($\text{Mo:Si} = 1:2$) ou un rapport légèrement riche en silicium (augmentation de 0,5 à 1 % du silicium), généralement à l'aide d'un broyeur planétaire à boulets ou d'un mélangeur en V, sous atmosphère inerte (comme l'argon) ou sous vide. Le milieu de broyage est de l'alumine ou de la zircone de haute pureté, le rapport billes/matière étant contrôlé entre 2:1 et 5:1, et le temps de mélange est de 4 à 8 heures afin de garantir une dispersion homogène des particules sans contamination. Des dopants (tels que Y_2O_3 , De , Al_2O_3 , ajouté à raison de 0,1 à 2 % en poids, est ajouté lors de l'étape de mélange. La granulométrie doit être contrôlée pour assurer une répartition uniforme. La poudre mélangée est tamisée pour éliminer les particules agglomérées, puis séchée pour éliminer l'humidité.

Pressage isostatique : Le pressage isostatique (pressage isostatique à froid, CIP) est la principale technologie de formage des éléments chauffants en MoSi_2 . La poudre mélangée est pressée pour obtenir la forme souhaitée (par exemple, un corps vert en U, en W ou en tige droite) par application d'une pression uniforme dans un milieu liquide (eau ou huile). Les avantages du pressage isostatique sont une pression uniforme et une densité élevée du corps vert, ce qui permet de réduire les irrégularités de retrait lors du frittage ultérieur. Le moule de moulage est généralement en caoutchouc souple ou en polyuréthane, résistant à la pression et insensible à la poudre de MoSi_2 . Les paramètres du procédé comprennent la pression, le temps de maintien et l'uniformité du remplissage de poudre. Il est également nécessaire de garantir l'absence de fissures et de délaminage du corps vert. Les formes complexes (comme les spirales) peuvent nécessiter un moulage segmenté ou une combinaison avec une technologie de préformage. Afin d'améliorer la résistance du corps vert, une faible quantité de liant organique peut être ajoutée, laquelle est éliminée lors du préfrittage ultérieur.

Procédé de frittage : Le frittage est une étape clé de la métallurgie des poudres, permettant au corps vert en MoSi_2 d'atteindre une densité élevée et de former une structure cristalline tétragonale stable de type

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

α . Les méthodes de frittage courantes incluent le frittage par pressage à chaud (HP) et le frittage sans pression. Le frittage par pressage à chaud est plus adapté aux éléments chauffants MoSi_2 hautes performances. Le frittage par pressage à chaud est réalisé sous vide ou sous atmosphère inerte (argon), à une température contrôlée entre 1 600 et 1 800 °C, sous une pression de 20 à 40 MPa et avec un temps de maintien de 1 à 3 heures. Pendant le frittage, le molybdène réagit avec le silicium pour former du MoSi_2 , tandis que les dopants (tels que Y_2O_3) favorisent la liaison des joints de grains et réduisent la porosité. La température de frittage doit être contrôlée avec précision. Une température trop élevée peut provoquer la volatilisation du silicium et réduire la qualité du film de SiO_2 ; une température trop basse peut entraîner une densité insuffisante, affectant la conductivité thermique et la résistance aux chocs thermiques. Le frittage sans pression convient aux applications sensibles aux coûts, avec une température de 1 700 à 1 900 °C, mais la faible densité peut augmenter le risque de microfissures.

Post- traitement : Les composants en MoSi_2 fritté nécessitent un post-traitement, comprenant le polissage de surface, l'ajustage dimensionnel et l'application de revêtements protecteurs. Le polissage de surface (à l'aide d'une meule diamantée) élimine les défauts de surface et réduit le risque de concentration de contraintes thermiques. L'ajustage dimensionnel garantit que les composants sont conformes aux spécifications de conception. Les revêtements protecteurs sont appliqués par projection plasma ou dépôt chimique en phase vapeur (CVD) pour améliorer la résistance à l'oxydation et à l'oxydation par fléau. Les contrôles qualité incluent les tests de densité (méthode d'Archimède), l'analyse de la microstructure (MEB) et la mesure de la résistivité afin de garantir que les performances des composants répondent aux exigences des applications de frittage de céramique, de fusion du verre, etc.

L'optimisation des procédés de métallurgie des poudres et de pressage isostatique nécessite une prise en compte complète des coûts et des performances. Le pressage à chaud combiné au pressage isostatique permet de produire des composants haute densité, adaptés aux applications de haute précision (comme le traitement thermique des semi-conducteurs); le frittage sans pression est peu coûteux et adapté aux fours industriels de grande taille. Le contrôle du procédé doit éviter la plage de températures critique de 400 à 700 °C afin d'éviter la formation d'oxydes non protecteurs. La pureté des matières premières, la qualité du corps vert et les paramètres de frittage doivent être régulièrement testés afin de garantir la stabilité et la fiabilité des éléments chauffants en MoSi_2 dans des atmosphères oxydantes à haute température.

4.3 Technologie de frittage et de post-traitement à haute température

Le frittage à haute température est le procédé principal de fabrication des éléments chauffants en disiliciure de molybdène (MoSi_2). Il vise à transformer le corps cru formé en un composant présentant une densité élevée ($\geq 98\%$ de la densité théorique), d'excellentes propriétés mécaniques et une structure cristalline tétragonale de type α stable. Sa conductivité thermique, sa résistance à l'oxydation et sa résistance aux chocs thermiques répondent aux exigences des applications à haute température. Le frittage est généralement réalisé sous vide ou sous atmosphère inerte (comme l'argon) pour éviter l'oxydation. Les méthodes courantes incluent le frittage par pressage à chaud (HP), le frittage sans pression et la synthèse auto-propagée à haute température (SHS). Le frittage par pressage à chaud est le procédé le plus courant pour les composants MoSi_2 hautes performances. La température est contrôlée

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

entre 1 600 et 1 800 °C, la pression entre 20 et 40 MPa et le temps de maintien entre 1 et 3 heures. La température élevée permet au molybdène de réagir pleinement avec le silicium pour former du MoSi_2 , tandis que le dopant favorise la liaison des joints de grains et réduit la porosité. La température de frittage doit être contrôlée avec précision. Une température trop élevée peut entraîner la volatilisation du silicium et affaiblir la qualité du film protecteur de SiO_2 en surface ; une température trop basse peut entraîner une densité insuffisante ($< 95\%$), réduisant la conductivité thermique et la résistance aux chocs thermiques.

La technologie de post-traitement est essentielle à l'optimisation des performances des composants MoSi_2 , notamment le polissage de surface, l'ajustage dimensionnel et les tests de performance. Le polissage de surface utilise des meules diamantées ou des abrasifs à base d'alumine pour éliminer les défauts de surface (tels que les micropores et les nodules de frittage) formés lors du frittage, réduire la concentration des contraintes thermiques et améliorer la résistance aux chocs thermiques. L'ajustage dimensionnel garantit la conformité des composants aux spécifications de conception grâce à un usinage de précision (par exemple, la découpe CNC) afin de répondre aux exigences de précision des structures en U, en W ou en spirale. Les tests de performance comprennent des tests de densité (méthode d'Archimède, cible $\geq 98\%$), une analyse de la microstructure et des mesures de résistivité afin de garantir la constance des performances électriques et thermiques des composants. Le traitement de préoxydation peut générer un film protecteur dense de SiO_2 à la surface afin d'améliorer la résistance à l'oxydation et la capacité anti-pesticide. Le post-traitement doit également être réalisé sous atmosphère inerte, en évitant la plage de températures de 400 à 700 °C afin d'éviter la formation d'oxydes non protecteurs (mélange de MoO_3 et de SiO_2). Un post-traitement de haute qualité peut améliorer considérablement la stabilité et la durée de vie des composants MoSi_2 dans des atmosphères oxydantes à haute température, répondant ainsi aux exigences des applications de haute précision telles que le traitement thermique des semi-conducteurs.

4.4 Technologie de couche de protection de surface

La technologie des couches de protection de surface est un élément important de la fabrication des éléments chauffants en MoSi_2 . L'application d'un revêtement protecteur améliore la résistance à l'oxydation, aux chocs thermiques et à la corrosion, et prolonge la durée de vie de l'élément en atmosphère oxydante à haute température. Le MoSi_2 forme naturellement un film protecteur de SiO_2 au-dessus de 800 °C. Cependant, à des températures extrêmes ou lors de cycles thermiques fréquents, ce film peut s'amincir en raison de la volatilisation du Si ou du MoO_3 , notamment dans la plage de températures de « peste » de 400 à 700 °C, propice au poudrage. La couche de protection de surface compense les défauts du film de SiO_2 par l'application d'un revêtement d'oxyde (tel que Al_2O_3 , ZrO_2), un revêtement en carbure (tel que SiC) ou un revêtement composite (tel que Al_2O_3 - SiC). Le revêtement Al_2O_3 (point de fusion d'environ 2050 °C) est appliqué par projection plasma ou dépôt chimique en phase vapeur (CVD) sur une épaisseur de 10 à 50 μm . Il présente une résistance élevée à l'oxydation et un faible coefficient de diffusion de l'oxygène, et convient aux fours de frittage céramique. Le revêtement SiC est appliqué par frittage réactionnel ou CVD sur une épaisseur de 20 à 100 μm . Il offre une résistance accrue aux chocs thermiques et à l'usure et convient aux fours de fusion du verre. Les revêtements composites combinent les avantages de plusieurs matériaux, tels que l' Al_2O_3 et le SiC . revêtements qui présentent à

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

la fois une résistance élevée à l'oxydation et aux chocs thermiques et qui conviennent à des conditions de travail complexes.

Le procédé d'application du revêtement a un impact significatif sur les performances. La projection plasma permet de former des revêtements épais et denses, adaptés à la production industrielle, mais des micropores peuvent apparaître, réduisant légèrement la conductivité thermique. Le procédé CVD produit des revêtements uniformes et minces (10-30 μm) présentant une forte adhérence et une faible contrainte thermique, adaptés aux applications de haute précision, mais dont le coût est relativement élevé. L'épaisseur du revêtement doit être contrôlée avec précision. Une épaisseur excessive peut provoquer un décollement dû à un décalage de dilatation thermique, tandis qu'une épaisseur trop fine peut offrir une protection insuffisante. La conception de l'interface (par exemple, l'ajout d'une couche de transition SiC) peut améliorer l'adhérence entre le revêtement et le substrat MoSi₂ et réduire la contrainte thermique. Le revêtement doit également résister à une humidité élevée ou à des atmosphères corrosives (comme les gaz soufrés). Les revêtements Al₂O₃ peuvent s'hydrater dans des environnements très humides, et les paramètres du procédé doivent être optimisés. Les contrôles qualité comprennent la mesure de l'épaisseur du revêtement (ultrasons ou MEB), des tests d'adhérence (méthode de rayure) et des tests de résistance à l'oxydation pour garantir les performances du revêtement. L'optimisation de la technologie des couches de protection de surface doit être prise en compte dans l'environnement d'application. Les fours de traitement thermique des semi-conducteurs nécessitent des revêtements CVD de haute pureté pour éviter la contamination, tandis que les fours de fusion du verre privilégient les revêtements SiC épais pour améliorer la résistance aux chocs thermiques. Un contrôle régulier de l'intégrité du revêtement et un passage rapide dans la plage de températures de 400 à 700 °C peuvent prévenir l'oxydation par fléau et la dégradation du revêtement. À l'avenir, les revêtements nanostructurés et les revêtements composites multicouches devraient améliorer encore les performances de surface des composants MoSi₂ afin de répondre aux exigences plus strictes des applications à haute température.

4.5 Technologie de soudage et de traitement final

La technologie de soudage et d'usinage final constitue l'étape finale de la fabrication des éléments chauffants en MoSi₂. Elle vise à garantir la stabilité et les performances électrothermiques de la connexion de l'extrémité froide à l'alimentation électrique, tout en optimisant la structure de l'extrémité pour résister aux contraintes mécaniques et thermiques. L'extrémité froide en MoSi₂ est dopée avec des matériaux hautement conducteurs (tels que l'aluminium ou le tungstène) afin de réduire la résistivité. Son diamètre est 1,5 à 2 fois supérieur à celui de l'extrémité chaude et doit être maintenu faible pour éviter toute dégradation par surchauffe. Le soudage est utilisé pour connecter l'extrémité froide au joint conducteur (tel qu'un alliage à base de nickel ou de cuivre), garantissant une faible résistance de contact (< 0,01 Ω) et une résistance mécanique élevée. Les méthodes de soudage courantes incluent le soudage plasma et le soudage par résistance. Le soudage plasma est réalisé sous atmosphère inerte (comme l'argon) et la température est régulée entre 1200 et 1400 °C. Il permet de former une soudure uniforme et très résistante, adaptée aux applications de haute précision (comme le traitement thermique des semi-conducteurs). Le soudage par résistance utilise un courant élevé pour chauffer rapidement l'extrémité froide et le joint. Son faible coût, mais l'uniformité de la soudure, légèrement inférieure, est adapté aux fours industriels. Pendant le soudage, il est impératif d'éviter les températures excessives afin d'éviter la

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

dégradation de la structure cristalline du MoSi_2 à l'extrémité chaude ou l'endommagement du film de SiO_2 .

La technologie d'usinage des extrémités comprend le traitement de surface de l'extrémité froide, l'ajustage dimensionnel et l'application d'un revêtement conducteur. La surface de l'extrémité froide est polie mécaniquement pour éliminer les couches d'oxyde et les défauts et améliorer ainsi la qualité du contact avec la pince ou la soudure. L'ajustage dimensionnel utilise l'usinage CNC ou la découpe au diamant pour garantir que le diamètre et la longueur de l'extrémité froide respectent les tolérances de conception et conviennent aux composants en U, en W ou à tige droite. Des revêtements conducteurs (tels que des couches aluminisées de 5 à 20 μm d'épaisseur) sont appliqués par galvanoplastie ou projection thermique pour améliorer la conductivité de l'extrémité froide, réduire la résistance de contact et prévenir la corrosion par oxydation. L'usinage des extrémités nécessite également d'optimiser la zone de transition entre l'extrémité chaude et l'extrémité froide, grâce à une technologie de transition conique ou de dopage par gradient pour lisser la répartition des contraintes thermiques et réduire le risque de microfissures (la ténacité à la rupture du MoSi_2 est d'environ $2 \text{ à } 3 \text{ MPa} \cdot \text{m}^{1/2}$). Le processus de traitement doit être effectué dans une atmosphère inerte pour éviter la plage de température « peste » de 400 à 700 °C et empêcher la formation d'oxydes non protecteurs.

L'optimisation du soudage et de l'usinage des extrémités doit tenir compte des conditions d'exploitation et des méthodes d'installation. Des cycles thermiques fréquents peuvent entraîner une concentration de contraintes dans la soudure ou l'extrémité. L'intégrité de la soudure et la température de l'extrémité froide doivent donc être vérifiées régulièrement. Des revêtements protecteurs (tels que SiC ou Al_2O_3 , d'une épaisseur de 10 à 50 μm) peuvent être appliqués sur l'extrémité froide pour améliorer la résistance à la corrosion et aux chocs thermiques. Le contrôle qualité comprend des essais de résistance des soudures (essai de traction ou de cisaillement), des mesures de résistance de contact et une analyse de la microstructure (MEB) pour garantir les performances de l'extrémité. Dans les applications pratiques, le soudage et l'usinage des extrémités doivent être coordonnés avec les systèmes de connexion électrique et la conception des supports (support en alumine) afin de garantir la stabilité à long terme des éléments chauffants en MoSi_2 dans des atmosphères oxydantes à haute température, et ainsi répondre aux exigences des applications de frittage de céramique, de fusion du verre, etc.



CTIA GROUP LTD Tige de silicate de molybdène

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

CTIA GROUP LTD
MoSi₂ Heating Element Introduction

1. Overview of MoSi₂ Heating Element

Molybdenum disilicide (MoSi₂) heating elements are high-performance ceramic electric heating materials widely used in industrial furnace applications. In high-temperature oxidizing atmospheres, MoSi₂ forms a dense silica (SiO₂) protective layer on its surface, which effectively prevents further oxidation. It exhibits excellent oxidation resistance and thermal stability, allowing stable operation under high temperatures for extended periods.

2. Features of MoSi₂ Heating Element

Low thermal expansion coefficient: Well-matched with common ceramic substrates, minimizing the risk of cracking caused by thermal stress.

Excellent oxidation resistance: Forms a dense SiO₂ protective film on the surface, effectively preventing material degradation from oxidation.

Extremely high working temperature: Capable of continuous operation up to 1700°C, and a maximum usage temperature of 1800°C in oxidizing atmospheres.

Good high-temperature electrical resistance characteristics: MoSi₂ exhibits relatively stable resistivity at high temperatures, with only a gradual increase in resistivity at elevated temperatures.

3. Specifications of MoSi₂ Heating Element

Model (d1/d2)	Hot End Diameter (d1)	Cold End Diameter (d2)	Hot Zone Length (Le)	Cold Zone Length (Lu)	Common Types
φ3/6	3 mm	6 mm	100–300 mm	150–250 mm	Straight / U-type
φ4/9	4 mm	9 mm	100–500 mm	200–300 mm	Straight / U-type
φ6/12	6 mm	12 mm	100–600 mm	200–350 mm	Straight / U-type / W-type
φ9/18	9 mm	18 mm	150–800 mm	250–400 mm	Straight / U-type / W-type
φ12/24	12 mm	24 mm	200–1000 mm	300–500 mm	Straight / U-type / W-type

4. Typical Applications of MoSi₂ Heating Element

High-temperature sintering furnaces in the ceramics and powder metallurgy industries

Heat treatment equipment for steel and non-ferrous metals

High-temperature laboratory furnaces

Diffusion, annealing, and oxidation processes in the semiconductor and photovoltaic industries

5. Purchasing Information

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

Website: www.molybdenum.com.cn

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 Test de performance de l'élément chauffant MoSi₂

5.1 Test de relation entre résistivité et température

La résistivité est un paramètre clé de performance électrothermique des éléments chauffants en disiliciure de molybdène (MoSi₂). Elle affecte directement leur efficacité de chauffage, leur puissance de sortie et la précision du contrôle de température. Le MoSi₂ présente une caractéristique de résistivité à coefficient de température positif (CTP), qui augmente avec la température. Ce coefficient lui permet d'ajuster la puissance de manière adaptative à haute température et convient aux applications à haute température telles que le frittage de céramique et la fusion du verre (jusqu'à 1800-1850 °C). Le test de la relation entre résistivité et température vise à quantifier les caractéristiques de résistance du MoSi₂ à différentes températures, à vérifier sa stabilité électrothermique et à fournir des données pour la conception des composants et l'optimisation des paramètres de fonctionnement. Ce test est généralement réalisé en laboratoire ou dans un four industriel, à l'aide d'un testeur de résistance de haute précision (tel que la méthode à quatre sondes) et d'un four à température contrôlée afin de garantir la fiabilité des données.

La méthode d'essai consiste à placer un élément chauffant en MoSi₂ (type U, type W, spécifications courantes Φ6/12 ou Φ9/18) dans un four à atmosphère oxydante contrôlée, à augmenter progressivement la température et à mesurer la résistivité entre la température ambiante (25 °C) et 1800 °C. L'équipement d'essai comprend une alimentation CC de haute précision (courant constant ou tension constante, densité de courant $\leq 10 \text{ A/mm}^2$), un multimètre numérique (précision $\pm 0,1 \%$) et un thermocouple (type K ou type S, précision $\pm 1 \text{ }^\circ\text{C}$). Pendant l'essai, il est nécessaire de franchir rapidement la plage de température critique de 400 à 700 °C afin d'éviter la formation d'oxydes non protecteurs (mélange de MoO₃ et de SiO₂) qui affectent la résistivité. La résistivité (ρ) est calculée par la formule $\rho = R \cdot A / L$, où R est la résistance mesurée, A est la section transversale de l'extrémité chaude et L est sa longueur. L'environnement d'essai maintient une atmosphère oxydante et une humidité inférieure à 30 % pour garantir la stabilité du film protecteur de surface en SiO₂.

Le MoSi₂ a une valeur d'environ $2,0 \times 10^{-5}$ à température ambiante $\Omega \cdot \text{cm}$, qui augmente considérablement avec la température et est d'environ $4,0 \times 10^{-5}$ à 1 000 °C $\Omega \cdot \text{cm}$, d'environ $4,5 \times 10^{-5}$ à 1 500 °C $\Omega \cdot \text{cm}$, jusqu'à $4,8 \times 10^{-5}$ à 1 800 °C $\Omega \cdot \text{cm}$. Ce coefficient de température positif permet à l'élément MoSi₂ d'avoir une puissance de sortie stable à haute température, mais cela signifie également que l'extrémité froide (dopée à l'aluminium ou au tungstène, avec une résistivité d'environ $0,5 \times 10^{-5} \Omega \cdot \text{cm}$) doit être maintenue basse pour éviter la surchauffe. Les résultats des tests montrent que la variation de résistivité avec la température est affectée par la pureté et la microstructure du matériau. La courbe de résistivité du MoSi₂ haute pureté est plus stable, et les fluctuations de résistivité des composants haute densité sont faibles. Une modification du dopage peut stabiliser davantage la résistivité et réduire la diffusion aux joints de grains. Le test doit également enregistrer l'effet des cycles thermiques sur la résistivité. Après plusieurs cycles thermiques, la résistivité peut augmenter légèrement, et la stabilité à long terme doit être évaluée.

Les précautions de test incluent l'étalonnage de la précision de l'équipement, la garantie de connexions froides stables (résistance de contact $< 0,01 \Omega$) et l'évitement des atmosphères réductrices ou à forte

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

humidité (une humidité > 70 % peut entraîner l'hydratation du film de SiO_2). Les données de test sont analysées en ajustant les courbes résistivité-température (telles que les polynômes quadratiques) afin d'optimiser la conception des composants et les systèmes de contrôle de puissance. Dans les applications pratiques, les résultats des tests de résistivité guident les paramètres de fonctionnement des composants MoSi_2 afin de garantir les performances électrothermiques et la précision du contrôle de température dans les atmosphères oxydantes à haute température.

5.2 Test sur la relation entre la durée de vie à haute température et la performance aux chocs thermiques

La durée de vie à haute température et la résistance aux chocs thermiques sont des indicateurs clés de performance des éléments chauffants en MoSi_2 , qui déterminent leur fiabilité et leur durabilité en atmosphères oxydantes à haute température (jusqu'à 1 800-1 850 °C). La durée de vie à haute température désigne le temps pendant lequel l'élément peut fonctionner en continu à la température cible sans dégradation significative de ses performances (comme une dérive de résistivité, une propagation de microfissures ou une rupture du film SiO_2), et la résistance aux chocs thermiques désigne la capacité de l'élément à résister à la fissuration lors de variations rapides de température (comme des cycles thermiques ou des refroidissements et chauffages rapides). La fragilité à basse température et l'oxydation par « peste » du MoSi_2 le rendent vulnérable aux dommages lors des cycles thermiques. Tester la relation entre la durée de vie à haute température et la résistance aux chocs thermiques vise à évaluer la durabilité de l'élément en conditions réelles d'utilisation (comme le frittage de céramique, le traitement thermique des métaux) et à fournir une base pour l'optimisation des matériaux et des conceptions. Les méthodes d'essai comprennent des essais de fonctionnement à haute température à long terme et des essais de cycles de chocs thermiques. L'essai de fonctionnement à haute température à long terme est réalisé dans un four à atmosphère oxydante. L'élément MoSi_2 (type U ou W, $\Phi 6/12$ ou $\Phi 9/18$) est placé à la température cible, la densité de puissance est contrôlée à 15-20 W/cm² et fonctionne en continu pendant 1 000 à 5 000 heures. L'évolution de la résistivité, de l'état de surface du film SiO_2 et de la microstructure est enregistrée. L'équipement d'essai comprend un four à haute température (précision ± 5 °C), un testeur de résistance (méthode à quatre sondes, précision $\pm 0,1$ %) et un microscope (MEB, analyse des fissures et des couches de film). L'essai de cycle de choc thermique simule un chauffage et un refroidissement rapides. Les conditions typiques sont des cycles de 25 à 1 500 °C, des vitesses de chauffage et de refroidissement de 10 à 20 °C/min, des cycles de 100 à 1 000 fois et un passage rapide à 400-700 °C pour éviter l'oxydation par « peste ». Après les essais, le nombre de fissures (microscope optique, grossissement 50 à 200×), l'épaisseur du film de SiO_2 et les variations de résistance mécanique (essai de flexion trois points, résistance à la rupture d'environ 200 à 300 MPa) ont été évalués.

Les résultats des tests montrent que la durée de vie des composants en MoSi_2 peut atteindre plus de 5 000 heures à 1 500 °C et environ 1 000 à 2 000 heures à 1 800 °C. La durée de vie est affectée par la stabilité du film de SiO_2 . À haute température, la volatilisation du Si et du MoO_3 peut entraîner un amincissement de la couche de film (< 5 μm), réduire la résistance à l'oxydation et augmenter la résistivité de 10 à 20 %, ce qui peut entraîner une dégradation des performances. Les composants en MoSi_2 de haute pureté ($\geq 99,5$ %) et les composants frittés pressés à chaud (densité ≥ 98 %) ont une durée de vie plus longue car les impuretés (telles que Fe, Al) et les pores réduisent l'affaiblissement des joints de grains et

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

l'amorçage des fissures. Une modification du dopage (par exemple, Y_2O_3 , 0,1 à 1 % en poids) peut améliorer la résistance des joints de grains et prolonger la durée de vie de 10 à 20 %. En termes de résistance aux chocs thermiques, les microfissures après cyclage thermique apparaissent principalement au niveau de la connexion extrémité chaude-extrémité froide. Les composants de type W présentent une meilleure résistance aux chocs thermiques que les composants de type U grâce à leur conception à extrémités chaudes multiples, et les composants à tige droite présentent une meilleure résistance aux fissures grâce à leur structure linéaire. Le revêtement de surface peut améliorer considérablement la résistance aux chocs thermiques, réduire la propagation des fissures (densité des fissures réduite de 30 à 50 %) et le décollement du film de SiO_2 . Les précautions d'essai incluent le maintien d'une atmosphère oxydante, l'évitement d'une humidité élevée (> 70 %) et des environnements réducteurs (provoquant une défaillance du film de SiO_2), ainsi que l'étalonnage régulier des thermocouples et des testeurs de résistance. Les données d'essai guident l'optimisation des matériaux (comme le dopage) et la conception structurelle (comme l'optimisation du rayon de courbure) des composants $MoSi_2$ grâce à des modèles de prédiction de durée de vie (comme le modèle d'Arrhenius) et à l'analyse statistique des fissures. Dans les applications pratiques, les résultats d'essai sont utilisés pour formuler des plans de maintenance (comme des inspections régulières des fissures et des couches de film) et des paramètres de fonctionnement afin de garantir la fiabilité à long terme et la stabilité aux chocs thermiques des éléments chauffants $MoSi_2$ dans les fours à haute température.

5.3 Test de stabilité en milieu oxydatif

Les tests de stabilité en milieu oxydant sont essentiels pour évaluer les performances à long terme des éléments chauffants en disiliciure de molybdène ($MoSi_2$) dans une atmosphère oxydante à haute température (jusqu'à 1 800-1 850 °C). Ils se concentrent sur la formation et la rétention du film protecteur de SiO_2 à sa surface, ses propriétés antioxydantes et la stabilité de sa microstructure. Le $MoSi_2$ offre une excellente résistance à l'oxydation en atmosphère oxydante en formant un film protecteur dense de SiO_2 à sa surface. Cependant, la volatilisation de Si ou de MoO_3 à haute température peut entraîner un amincissement de la couche de film, en particulier dans la plage de températures de « peste » de 400 à 700 °C, où une oxydation non protectrice est susceptible de se produire, générant un mélange de MoO_3 et de SiO_2 , entraînant la pulvérisation du matériau. Le test de stabilité est conçu pour quantifier la durée de vie, le changement de résistivité et l'état de surface des éléments $MoSi_2$ dans un environnement oxydant, et pour fournir des données fiables pour les applications à haute température telles que le frittage de céramique et la fusion du verre.

Les méthodes d'essai comprennent un essai d'oxydation à long terme et un essai d'oxydation cyclique. L'essai d'oxydation à long terme place l'élément $MoSi_2$ (tel que type U, type W, $\Phi 6/12$ ou $\Phi 9/18$) dans un four à atmosphère d'oxydation haute température. La température est contrôlée entre 1 500 et 1 800 °C, la densité de puissance est de 15 à 20 W/cm² et le four fonctionne en continu pendant 1 000 à 5 000 heures. L'équipement d'essai comprend un four haute température, un testeur de résistance (méthode à quatre sondes, précision $\pm 0,1$ %), un microscope électronique à balayage (MEB) et un diffractomètre à rayons X (DRX) pour analyser l'épaisseur du film de SiO_2 (cible 10 à 20 μm), la morphologie de surface et la composition des phases. L'essai d'oxydation cyclique simule le cycle thermique en conditions réelles de fonctionnement, avec des températures de 25 à 1 500 °C ou de 25 à 1 800 °C, une vitesse de chauffage

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

et de refroidissement de 5 à 10 °C/min, un nombre de cycles de 100 à 1 000 et un passage rapide de 400 à 700 °C pour éviter l'oxydation par fléau. Après l'essai, les variations de résistivité, l'intégrité du film de SiO₂, le nombre de fissures et la perte de masse ont été évalués.

Les résultats des tests montrent que les composants MoSi₂ ont une stabilité élevée dans une atmosphère oxydante à 1500 °C, avec une durée de vie de plus de 5000 heures, le film SiO₂ reste dense (épaisseur 10-15 µm) et l'augmentation de la résistivité est inférieure à 10 %. Les composants MoSi₂ de haute pureté et frittés pressés à chaud (densité ≥ 98 %) ont une meilleure stabilité, moins de défauts de film et un taux de perte de masse inférieur à 0,5 mg/cm²/1000 h. La modification du dopage (comme Y₂O₃, 0,1-1 % en poids) peut améliorer l'adhérence du film SiO₂ et réduire le pelage. Les essais d'oxydation cyclique montrent que les fissures de choc thermique apparaissent principalement à la jonction entre les extrémités chaudes et froides, et que le composant de type W est légèrement supérieur au type U grâce à sa conception multi-extrémités chaudes. Les revêtements de surface (tels que SiC ou Al₂O₃, d'épaisseur 10-50 µm) peuvent améliorer considérablement la stabilité et réduire la perte de masse de 30 à 50 %. L'essai doit éviter une humidité élevée (humidité > 70 %) ou une atmosphère contenant du soufre afin d'éviter l'hydratation ou la corrosion du film de SiO₂.

5.4 Test de dureté de l'élément chauffant

Les essais de dureté constituent un moyen important d'évaluer les propriétés mécaniques des éléments chauffants en MoSi₂, reflétant directement leur résistance à l'usure, aux contraintes mécaniques et à la fissuration par choc thermique. Composé intermétallique, le MoSi₂ présente une dureté élevée, mais sa fragilité à basse température facilite la formation de microfissures lors de chocs mécaniques ou de cycles thermiques. Cet essai de dureté est conçu pour quantifier la dureté superficielle et la résistance microstructurale des composants en MoSi₂, fournissant ainsi une base pour l'optimisation des procédés de fabrication (comme le frittage par pressage à chaud) et la modification du dopage, et répondant aux exigences de stabilité mécanique d'applications telles que le frittage de céramique et le traitement thermique des métaux.

La méthode d'essai utilise l'essai de dureté Vickers. Un duromètre Vickers est utilisé pour appliquer une empreinte sur la surface de l'élément MoSi₂ (extrémités chaude et froide). La longueur diagonale de l'empreinte est mesurée (précision ± 0,1 µm) pour calculer la dureté. L'essai est réalisé à température ambiante et la surface de l'échantillon doit être propre afin d'éviter l'influence d'une couche d'oxyde ou d'impuretés. L'essai de dureté à haute température utilise un duromètre haute température pour simuler les conditions de fonctionnement réelles. Il doit être réalisé sous atmosphère inerte (par exemple, de l'argon) pour éviter l'oxydation. Pour évaluer l'uniformité de la dureté, les points d'essai couvrent les extrémités chaude, froide et de transition entre les extrémités chaude et froide, avec au moins 5 points par zone, et la valeur moyenne est prise en compte (écart < 5 %). Les essais auxiliaires comprennent l'analyse microstructurale et l'évaluation de la propagation des fissures.

Français Les résultats des tests montrent que la dureté Vickers à température ambiante des composants MoSi₂ est de 8 à 10 GPa, qui chute à environ 4 à 6 GPa à 1 500 °C en raison du glissement des joints de grains et des effets de ramollissement à haute température. Les composants MoSi₂ de haute pureté et les

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

composants frittés pressés à chaud (densité $\geq 98\%$) ont une dureté plus élevée (proche de 10 GPa) en raison d'une faible porosité ($< 2\%$) et d'un nombre réduit de défauts aux joints de grains. Une modification du dopage (telle que Y_2O_3 ou Al_2O_3 , 0,1 à 2 % en poids) peut augmenter la dureté de 5 à 10 % car les oxydes de terres rares améliorent la force de liaison des joints de grains. La dureté de l'extrémité froide est légèrement inférieure à celle de l'extrémité chaude (environ 7 à 9 GPa) car le dopage à l'aluminium ou au tungstène réduit la résistance du cristal. La dureté peut chuter de 5 à 15 % après un cycle thermique en raison de l'accumulation de microfissures. Les revêtements de surface peuvent améliorer considérablement la résistance à l'usure, mais leur décollement peut exposer le substrat. L'essai nécessite une profondeur d'indentation contrôlée ($< 10\%$ de l'épaisseur de l'échantillon) pour éviter les effets de matrice. Les résultats permettent d'évaluer la durabilité mécanique des composants lors de l'installation, de l'exploitation et de la maintenance.

5.5 Test sur la relation entre la résistance à l'oxydation et la température

Le test de résistance à l'oxydation et de température est au cœur du test de performance de l'élément chauffant $MoSi_2$. Ce test vise à évaluer son comportement à l'oxydation à différentes températures, la formation et la stabilité du film protecteur de SiO_2 , ainsi que la perte de masse du matériau et la variation de résistivité, afin de fournir des données fiables pour les applications à haute température (telles que la fusion du verre et le traitement thermique des semi-conducteurs). La résistance à l'oxydation du $MoSi_2$ dépend du film protecteur de SiO_2 en surface, qui forme une couche dense au-dessus de 800 °C, mais est susceptible de générer des oxydes non protecteurs dans la plage de températures de « peste » de 400 à 700 °C, entraînant un poudrage; à près de 1850 °C, la volatilisation du Si peut entraîner un amincissement du film. Ce test est conçu pour quantifier l'évolution de la résistance à l'oxydation en fonction de la température et optimiser la température de fonctionnement et la stratégie de maintenance.

Les méthodes d'essai comprennent un essai d'oxydation à température constante et un essai d'oxydation à température variable. L'essai d'oxydation à température constante place l'élément $MoSi_2$ (tel que type U, type W, $\Phi 6/12$ ou $\Phi 9/18$) dans un four à atmosphère oxydante dont la température varie de 400 à 1800 °C, la durée de fonctionnement est de 100 à 1000 heures et la densité de puissance est de 15 à 20 W/cm². L'équipement d'essai comprend un four haute température (précision ± 5 °C), une balance de précision (précision $\pm 0,1$ mg), un microscope électronique à balayage (MEB) et une DRX pour mesurer le taux de perte de masse (mg/cm²/h), l'épaisseur du film de SiO_2 et la composition des phases. L'essai d'oxydation à température variable simule des cycles thermiques à des températures de 25 à 1 500 °C ou de 25 à 1 800 °C, avec une vitesse de chauffage et de refroidissement de 5 à 10 °C/min, 50 à 500 cycles et un passage rapide de 400 à 700 °C. Après l'essai, la variation de résistivité (méthode à quatre sondes, précision $\pm 0,1\%$), l'intégrité du film (MEB) et la densité des fissures (microscope optique, grossissement 50 à 200 $\times$) ont été évaluées.

Les résultats des tests montrent que le $MoSi_2$ présente la meilleure résistance à l'oxydation entre 800 et 1 500 °C. L'épaisseur du film de SiO_2 est stable, le taux de perte de masse est inférieur à 0,2 mg/cm²/1 000 h et l'augmentation de la résistivité est inférieure à 10 %. Entre 400 et 700 °C, l'oxydation non protectrice entraîne une perte de masse allant jusqu'à 1 à 2 mg/cm²/100 h, et la résistivité augmente de 20 à 30 %. Il est nécessaire de franchir cette plage rapidement. À 1 800 °C, la volatilisation du silicium

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

s'intensifie, le film de SiO_2 s'amincit, le taux de perte de masse augmente à $0,5$ à $1 \text{ mg/cm}^2/1\ 000 \text{ h}$ et la durée de vie est réduite à $1\ 000$ à $2\ 000$ heures. Les composants en MoSi_2 haute pureté et frittés pressés à chaud (densité $\geq 98 \%$) présentent une meilleure résistance à l'oxydation et moins de défauts de film. La modification du dopage améliore l'adhérence du film et réduit la perte de masse de 20 à 30% . Le revêtement de surface améliore significativement la résistance à l'oxydation, notamment à $1800\ ^\circ\text{C}$, où la perte de masse est réduite de 40 à 60% . L'essai doit éviter une humidité élevée ou une atmosphère réductrice afin de garantir la fiabilité des données. Les résultats permettent d'optimiser la température de fonctionnement (1500 - $1700\ ^\circ\text{C}$ recommandée) et le plan de maintenance (comme l'inspection régulière de la couche membranaire) grâce à une analyse cinétique d'oxydation (modèle parabolique).

5.6 Relation entre la rugosité de la surface de la tige et la résistivité

La rugosité de surface est un facteur important affectant les performances électrothermiques des éléments chauffants en disiliciure de molybdène (MoSi_2) et est directement liée à l'uniformité de sa résistivité et à la distribution du courant. La rugosité de surface des composants en MoSi_2 est principalement déterminée par le procédé de fabrication (pressage à chaud et pressage isostatique, par exemple) et les traitements ultérieurs (polissage et sablage, par exemple). Des surfaces présentant une rugosité élevée peuvent entraîner une concentration locale du courant, des contraintes thermiques inégales et la formation irrégulière d'un film protecteur de SiO_2 , affectant ainsi la stabilité de la résistivité. Tester la relation entre rugosité de surface et résistivité vise à quantifier l'impact de la morphologie de surface sur les performances électrothermiques, à fournir une base pour l'optimisation des procédés de fabrication et de la conception des composants, et est particulièrement adapté aux scénarios de contrôle de température de haute précision tels que le frittage de céramique et la fusion du verre. La méthode d'essai utilise un rugosimètre de surface (tel qu'un profilomètre ou un microscope à force atomique, avec une précision de $\pm 0,01\ \mu\text{m}$) pour mesurer les paramètres de rugosité de surface (tels que R_a , R_z) de la tige de MoSi_2 . La zone d'essai couvre l'extrémité chaude et l'extrémité froide, et la surface de l'échantillon doit être propre pour éviter toute interférence due aux impuretés. L'essai de résistivité utilise une méthode à quatre sondes (précision de $\pm 0,1 \%$), mesurée dans la plage de température ambiante à $1\ 800\ ^\circ\text{C}$, combinée à des échantillons de rugosités différentes. L'environnement d'essai est une atmosphère oxydante, et la plage de température de « peste » de 400 à $700\ ^\circ\text{C}$ est rapidement franchie pour éviter la formation d'oxydes non protecteurs. La résistivité (ρ) est calculée par la formule $\rho = R \cdot A/L$, où R est la résistance mesurée, A est la section transversale et L est la longueur d'essai. Le test doit enregistrer l'effet de la rugosité de surface sur la formation du film SiO_2 (observation SEM, grossissement 50 - $200\times$) et l'uniformité de la distribution du courant (thermomètre infrarouge, précision $\pm 1^\circ\text{C}$).

La résistivité des tiges de MoSi_2 présentant une rugosité de surface plus faible est plus stable et présente une plage de fluctuation plus faible, car la surface lisse réduit la concentration locale de courant et l'accumulation de contraintes thermiques. Les surfaces très rugueuses peuvent entraîner des augmentations locales de la résistivité, car les défauts de surface augmentent la diffusion aux joints de grains et les trajets de courant irréguliers. L'élément MoSi_2 poli présente un film de SiO_2 plus uniforme (épaisseur 10 - $15\ \mu\text{m}$) à haute température, avec une variation de résistivité moindre, ce qui convient aux applications de haute précision. Les surfaces sablées ou rugueuses sont sujettes aux microfissures pendant les cycles thermiques, ce qui augmente les fluctuations de résistivité et affecte la stabilité à long

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

terme. Le test nécessite l'étalonnage de la précision de l'équipement, le contrôle des connexions froides et des conditions atmosphériques, et l'évitement d'une humidité élevée (humidité > 70 %) provoquant l'hydratation du film de SiO_2 . Les données sont analysées en ajustant la courbe rugosité-résistivité et utilisées pour optimiser le processus de traitement de surface (tel que le polissage chimique ou la pulvérisation plasma) afin d'améliorer les performances électrothermiques et la précision du contrôle de la température des éléments MoSi_2 .

5.7 Effet de l'uniformité du revêtement des tiges sur la durée de vie

Le revêtement de surface des éléments chauffants en MoSi_2 (tels que SiC , Al_2O_3 , épaisseur 10-50 μm) est essentiel pour améliorer la résistance aux chocs thermiques et à la corrosion. L'uniformité du revêtement affecte directement la stabilité du film protecteur de SiO_2 , la vitesse d'oxydation et la durée de vie de l'élément. Un revêtement irrégulier peut entraîner une résistance locale insuffisante à l'oxydation, une concentration de contraintes thermiques ou un décollement, et réduire la durée de fonctionnement de l'élément dans un environnement d'oxydation à haute température (comme le frittage de céramique ou la fabrication de semi-conducteurs). Tester l'effet de l'uniformité du revêtement sur la durée de vie vise à évaluer l'effet de la qualité du revêtement sur la durabilité des composants et à fournir des données pour optimiser les procédés de revêtement (tels que le dépôt chimique en phase vapeur et la projection plasma).

Les méthodes d'essai comprennent la détection de l'uniformité du revêtement et un essai de durée de vie à haute température. L'uniformité du revêtement est analysée par microscopie électronique à balayage (MEB, précision $\pm 0,1 \mu\text{m}$) et spectromètre à rayons X (EDS), mesurant la distribution de l'épaisseur du revêtement et l'uniformité de la composition (rapport Si/C dans SiC ou rapport Al/O dans Al_2O_3). Les échantillons comprennent des tiges de MoSi_2 avec différents procédés de revêtement (tels que le revêtement CVD, le revêtement par pulvérisation), et la zone d'essai couvre la zone de transition entre l'extrémité chaude et l'extrémité froide. L'essai de durée de vie à haute température est réalisé dans un four à atmosphère oxydante avec une plage de température de 1 500 à 1 800 $^{\circ}\text{C}$, une densité de puissance de 15 à 20 W/cm^2 , une durée de fonctionnement de 1 000 à 5 000 heures et un passage rapide de 400 à 700 $^{\circ}\text{C}$ pour éviter l'oxydation par « brûlure ». Le test enregistre le taux de perte de masse (balance de précision, précision $\pm 0,1 \text{ mg}$), l'état du film SiO_2 (observation au MEB) et la variation de résistivité (méthode à quatre sondes, précision $\pm 0,1 \%$). Les tests auxiliaires comprennent l'adhérence du revêtement et la résistance aux chocs thermiques.

MoSi_2 (écart d'épaisseur < 5 %) est considérablement améliorée, car ce revêtement uniforme favorise la formation stable du film de SiO_2 et réduit l'oxydation locale et le pelage. Les revêtements CVD présentent une durée de vie plus longue à 1800 $^{\circ}\text{C}$ grâce à leur densité et leur adhérence élevées, ce qui les rend adaptés aux applications exigeantes. Si le revêtement pulvérisé présente une épaisseur inégale (écart > 10 %), il peut se décoller dans la zone de transition entre les extrémités chaude et froide, ce qui amincit le film de SiO_2 , accélère la dégradation par oxydation et réduit sa durée de vie. Les revêtements uniformes réduisent également la densité des microfissures lors des cycles thermiques et améliorent la résistance aux chocs thermiques. Le test nécessite un contrôle de l'atmosphère et des vitesses de chauffage et de refroidissement afin d'éviter une humidité élevée ou des environnements réducteurs (qui

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

entraînent la défaillance du film de SiO_2). Les données guident les stratégies d'optimisation et de maintenance du processus de revêtement (telles que l'inspection régulière de l'intégrité du revêtement) grâce à l'analyse de la relation épaisseur-durée de vie du revêtement pour garantir la fiabilité à long terme des composants MoSi_2 dans des environnements oxydants à haute température.

5.8 Relation entre la durée de vie et le couplage des contraintes

MoSi_2 sont soumis au couplage des contraintes thermiques, mécaniques et environnementales, notamment dans les atmosphères oxydantes à haute température et les cycles thermiques fréquents. Les contraintes thermiques proviennent du gradient de température dû à un chauffage et un refroidissement rapides, les contraintes mécaniques proviennent des vibrations d'installation ou de fonctionnement, et les contraintes environnementales sont liées aux atmosphères oxydantes ou corrosives. Le couplage des contraintes peut provoquer la propagation de microfissures, le décollement du film de SiO_2 ou une dérive de résistivité, réduisant ainsi la durée de vie de l'élément. Tester la relation entre durée de vie et couplage des contraintes vise à quantifier l'impact des contraintes sur la durabilité des éléments en MoSi_2 , à fournir une base pour l'optimisation de la conception (forme, support, etc.) et des paramètres de fonctionnement (vitesses de chauffage et de refroidissement, etc.). Ce couplage est adapté aux applications à haute température telles que le frittage de la céramique et le traitement du verre.

Les méthodes d'essai comprennent la simulation des contraintes et un essai de durée de vie. La simulation des contraintes utilise l'analyse par éléments finis (FEA) pour évaluer la distribution des contraintes thermiques dans la zone de transition chaud-froid (sur la base du coefficient de dilatation thermique et de la conductivité thermique du MoSi_2), combinée à des essais de contraintes mécaniques (essai de flexion trois points, précision $\pm 0,1$ MPa). L'essai de durée de vie est réalisé dans un four à atmosphère oxydante, à une température de 1 500 à 1 800 °C, une densité de puissance de 15 à 20 W/cm², une durée de fonctionnement de 1 000 à 5 000 heures et des conditions de cycle thermique de 25 à 1 500 °C. Les échantillons d'essai comprennent des éléments MoSi_2 en forme de U et de W ($\Phi 6/12$ ou $\Phi 9/18$), et certains revêtements de surface (tels que le SiC) sont appliqués. L'essai enregistre le taux de perte de masse (balance de précision, précision $\pm 0,1$ mg), la densité des fissures (MEB, grossissement 50-200 $\times$), l'état du film SiO_2 et la variation de résistivité (méthode à quatre sondes). Les contraintes environnementales sont simulées par l'introduction de gaz corrosifs traces (tels que SO_2) pour évaluer l'impact sur la durée de vie.

Les résultats des tests montrent que la contrainte thermique est le principal facteur affectant la durée de vie des composants en MoSi_2 . Les variations rapides de température entraînent une concentration des contraintes dans la zone de transition entre l'extrémité chaude et l'extrémité froide, augmentent la densité des microfissures et réduisent la durée de vie. Le composant de type W présente une répartition des contraintes plus uniforme grâce à sa conception à extrémités chaudes multiples, et sa durée de vie est supérieure à celle du type U. Les contraintes mécaniques (telles que les vibrations ou une installation incorrecte) aggravent la propagation des fissures, réduisent la ténacité à la rupture et réduisent la durée de vie. Le revêtement de surface atténue considérablement l'effet de couplage des contraintes, et un revêtement uniforme réduit l'écaillage causé par la contrainte thermique et prolonge la durée de vie. Une modification du dopage (par exemple, Y_2O_3) améliore la résistance aux joints de grains et réduit la

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

sensibilité aux contraintes. Les contraintes environnementales (telles qu'une atmosphère corrosive) accélèrent la dégradation du film de SiO_2 , et l'atmosphère doit être strictement contrôlée. Le test nécessite des thermocouples étalonnés (précision $\pm 1^\circ\text{C}$) et des pinces. Les données guident l'optimisation de la conception (comme l'augmentation du rayon de courbure) et des paramètres de fonctionnement grâce à des modèles de contrainte-durée de vie (tels que l'analyse de Weibull) pour garantir la fiabilité à long terme des composants MoSi_2 dans des environnements à haute température et à contraintes complexes.

5.9 Mécanismes de fissuration, de flexion et d'ablation terminale

Lors d'un fonctionnement prolongé à haute température, les éléments chauffants en disiliciure de molybdène présentent souvent des défaillances dues à des fissures, des flexions et des ablations terminales. Ces problèmes réduisent non seulement la stabilité de leurs performances, mais affectent également directement la sécurité de fonctionnement et la durée de vie de l'ensemble du système de chauffage.

La plupart des phénomènes de fissuration sont liés aux contraintes thermiques. Lorsque l'élément chauffant chauffe ou refroidit rapidement dans un environnement à haute température, le gradient de température entre les couches interne et externe du matériau est important, ce qui peut facilement provoquer une dilatation thermique irrégulière à l'intérieur du matériau, entraînant ainsi une concentration des contraintes thermiques. Si la conception structurelle est déraisonnable, si les dimensions géométriques sont asymétriques ou si les composants présentent des défauts microscopiques (tels que des pores et des inclusions), les contraintes thermiques provoquent l'expansion de microfissures et, à terme, la formation de fissures macroscopiques. De plus, si l'épaisseur du film d'oxyde de silicium formé lors du processus d'oxydation est irrégulière, des fissures peuvent également se former en raison des différences de contraintes, notamment lors d'un refroidissement brutal à haute température ou d'un refroidissement à l'arrêt.

La flexion se produit souvent lorsque la structure de suspension ou de support est instable pendant l'utilisation, ou lorsque le matériau subit une déformation plastique à haute température sous l'effet de la gravité ou de forces mécaniques externes. Bien que le MoSi_2 soit une céramique fragile et peu plastique, sa structure subit un certain degré d'écoulement visqueux à haute température (supérieure à $1\,500^\circ\text{C}$), en particulier les structures à section mince et les cantilever longs, qui sont sujettes à la flexion sous l'action de leur propre poids à haute température. Une fois la flexion formée, le risque de propagation de fissures lors du réchauffage augmente également.

L'ablation d'extrémité est un phénomène courant de défaillance locale des éléments chauffants en MoSi_2 , principalement localisé dans la zone connectée à l'électrode ou où se concentre une forte densité de courant. Cette zone subit souvent une oxydation ou une évaporation importante due à une résistance de contact excessive, un claquage de l'arc, une accumulation de chaleur ou une circulation d'air locale insuffisante. Sous des conditions de température et de courant élevées, des points chauds locaux peuvent se former à la surface du MoSi_2 , entraînant une volatilisation accrue du silicium et la destruction de la structure du film protecteur, formant ainsi des piqûres d'ablation ou des cavités de fusion. De plus, un traitement incorrect de l'extrémité, par exemple en cas d'élimination insuffisante du film d'oxyde, de

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

mauvaise qualité de soudage ou de surface de contact insuffisante, accélère également le processus d'ablation. Afin de retarder ou d'éviter les défaillances ci-dessus, il est nécessaire d'optimiser la conception structurelle, le processus d'installation, le contrôle électrique et l'environnement d'utilisation, etc. Par exemple, l'adoption d'une méthode de support raisonnable pour réduire la concentration de contrainte thermique, le contrôle de la vitesse de chauffage pour réduire le risque de choc thermique, l'amélioration de la structure de contact conductrice d'extrémité pour réduire la résistance de contact et la garantie de l'intégrité du film d'oxyde peuvent prolonger efficacement la durée de vie du composant.

5.10 Analyse de la microstructure et étude des modes de défaillance

L'analyse de la microstructure est essentielle pour comprendre le mécanisme de défaillance des éléments chauffants en MoSi_2 . Elle permet de révéler les causes essentielles des variations physiques, chimiques et mécaniques dans les environnements à haute température, à l'échelle du matériau. L'observation microscopique de la section transversale, de la surface et de la structure interne de l'élément avant et après utilisation permet d'identifier la structure granulaire, les modifications des limites de phase, le comportement de la croissance du film d'oxyde et la distribution potentielle des microfissures.

Dans un environnement d'oxydation à haute température, un film protecteur dense de SiO_2 se forme à la surface du matériau MoSi_2 , créant une interface nette entre le film et le substrat. Des oscillations à haute température ou une corrosion chimique lors d'une utilisation prolongée peuvent provoquer un décollement de l'interface ou la formation d'une couche d'oxyde poreuse, affectant ainsi les performances de protection. De plus, l'analyse microscopique révèle souvent la présence d'une faible quantité de particules de seconde phase dans le MoSi_2 , telles que Mo_5Si_3 , qui ont également un effet sur la stabilité structurelle globale à différents degrés d'oxydation.

La recherche sur les modes de défaillance se concentre principalement sur les chemins de propagation des fissures, les mécanismes de rupture de la couche d'oxyde, les tendances de diffusion des éléments et les comportements de changement de phase. L'analyse microscopique est souvent réalisée en conjonction avec la microscopie électronique à balayage (MEB) et la spectroscopie dispersive en énergie (EDS), qui permettent de montrer clairement que les fissures proviennent principalement de zones faiblement liées aux joints de grains, ou que les dommages macroscopiques sont causés par les connexions interstitielles induites par la contrainte d'oxydation. De plus, l'analyse des différences d'épaisseur du film d'oxyde formé à différentes températures et durées de fonctionnement permet de déduire la cinétique d'oxydation, établissant ainsi un modèle de taux de dégradation des matériaux.

Les recherches montrent que la plupart des défaillances sont principalement causées par les effets combinés de « l'oxydation, des contraintes thermiques et des défauts structurels ». Autrement dit, le matériau forme un film protecteur lors de l'oxydation à haute température, mais la différence de contrainte pendant le cycle thermique provoque la rupture du film, ce qui entraîne l'oxydation continue de la nouvelle surface exposée, ce qui entraîne une concentration des contraintes et une expansion des microfissures, et finalement la destruction de la structure globale du matériau. Ce schéma d'accumulation cyclique et progressif est un comportement typique de fatigue-corrosion thermique.

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

Afin d'améliorer la résistance aux défaillances, les recherches futures pourraient introduire des éléments traces (tels que l'aluminium, le zinc, etc.) dans la matrice MoSi_2 afin d'améliorer la stabilité du film d'oxyde, ou utiliser une structure biphasée ou à gradient pour atténuer les contraintes thermiques. De plus, le contrôle de la granulométrie, l'optimisation du frittage et l'augmentation de la densité permettraient d'améliorer efficacement l'uniformité de la microstructure, de réduire le taux de défauts et d'améliorer la résistance globale aux défaillances.



CTIA GROUP LTD Tige de silicium-molybdène

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

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

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

Chapitre 6 Installation des éléments chauffants MoSi₂

6.1 Préparations avant l'installation

Lors de l'installation de l'élément chauffant MoSi₂, une préparation rigoureuse est nécessaire pour garantir le bon déroulement des opérations ultérieures et éviter tout dommage à l'élément ou toute dégradation des performances due à une mauvaise utilisation. Il convient tout d'abord de vérifier les spécifications, les niveaux de tension, les paramètres de puissance et les dimensions de l'élément chauffant afin de garantir leur conformité avec les plans de conception et les instructions d'utilisation de l'équipement. Si nécessaire, une comparaison physique doit être effectuée afin d'éviter que des erreurs de modélisation n'affectent le fonctionnement du système.

Deuxièmement, vérifiez l'intégrité de la structure de la cavité du four de chauffage, du support, de la fixation des électrodes et du matériau isolant, notamment pour vérifier que le lieu d'installation est propre, exempt d'impuretés et offre une bonne isolation. Le four doit être maintenu au sec afin d'éviter que l'humidité n'interfère avec le film d'oxyde haute température ou ne provoque un court-circuit.

Les outils et matériaux auxiliaires utilisés lors de l'installation doivent également être préparés à l'avance, notamment les supports en céramique, les colliers de serrage en acier inoxydable, les outils dynamométriques, les joints isolants et les matériaux conducteurs résistants aux hautes températures. Les opérateurs doivent porter des gants isolants propres et il est strictement interdit de toucher les parties chauffantes des composants MoSi₂ à mains nues afin d'éviter toute pollution par l'huile susceptible d'affecter la formation d'un film d'oxyde.

De plus, une formation de base en sécurité doit être dispensée aux installateurs afin de clarifier les procédures d'utilisation, les précautions et les mesures de protection à suivre lors du transport et de la manutention des composants. Pour les nouveaux équipements utilisés pour la première fois, un essai de montée en température à vide du four doit également être effectué afin de vérifier si le système de commande électrique et la dilatation thermique du corps du four sont conformes aux attentes.

6.2 Étapes d'installation détaillées

L'installation des éléments chauffants en MoSi₂ doit être réalisée en stricte conformité avec les étapes standard afin de garantir un bon contact électrique, un bon support thermique et une bonne protection contre l'oxydation en fonctionnement. Voici les étapes clés du processus d'installation standardisé :

La première étape consiste à confirmer le positionnement : vérifiez la position d'installation de chaque élément chauffant conformément aux plans de l'équipement et à l'identification des composants. Veillez à la symétrie et à l'équilibre des électrodes lorsque plusieurs éléments sont connectés en parallèle afin d'éviter toute surchauffe locale due à une charge inégale. La deuxième étape consiste à fixer le support : placez l'élément chauffant en MoSi₂ sur un support en céramique ou une structure de support, et ajustez sa position afin de garantir que la partie chauffante soit centrée et dégagée de l'espace du four. La structure de support doit présenter une certaine flexibilité pour s'adapter à la déformation de l'élément lors de la

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

dilatation thermique et éviter les fissures dues aux contraintes mécaniques. La troisième étape est la connexion des électrodes : utilisez un support d'électrode spécial pour connecter fermement l'extrémité conductrice au câble d'alimentation. La fixation doit être pressée sans excès pour éviter la rupture du composant. La surface de connexion doit être maintenue propre et une pâte conductrice haute température peut être utilisée pour améliorer la résistance de contact si nécessaire. Lors de l'installation, l'électrode et le câble doivent être isolés par des matériaux isolants appropriés afin d'éviter les décharges d'arc. La quatrième étape est l'inspection et le réglage fin : une fois tous les composants connectés, vérifiez leur hauteur, leur planéité et leur parallélisme afin de vous assurer que chaque composant est soumis à des contraintes uniformes et disposé de manière appropriée. Vérifiez notamment la symétrie et l'uniformité du support afin d'éviter une distribution inégale du courant.

Étape 5, test du système : Avant de mettre sous tension, utilisez un multimètre ou un testeur d'isolement pour vérifier que la valeur de résistance se situe dans la plage normale. Après la mise sous tension, effectuez d'abord un test de préchauffage à basse tension pendant une courte durée afin d'observer tout échauffement anormal, étincelles, bruit anormal, etc. Après avoir vérifié que tout est normal, augmentez progressivement la température. Étape 6, stabilité du fonctionnement thermique : Avant la production formelle, il est recommandé d'effectuer un cycle complet de chauffage, d'isolement et de refroidissement afin de vérifier la stabilité du fonctionnement des composants et l'uniformité de la distribution de chaleur de l'équipement. En cas d'anomalie, la machine doit être immédiatement arrêtée pour inspection afin d'éviter des dommages irréversibles aux composants.

Grâce à des étapes d'installation standardisées, le taux de défaillance des éléments chauffants en disiliciure de molybdène en début de fonctionnement peut être efficacement réduit, garantissant leur fonctionnement stable à long terme, prolongeant leur durée de vie et jetant de bonnes bases pour le fonctionnement sûr et efficace des équipements à haute température.

6.3 Notes d'installation

Lors de l'installation des éléments chauffants en MoSi₂, une attention particulière doit être portée à plusieurs détails clés afin d'éviter tout dommage, tout dysfonctionnement du four ou tout fonctionnement instable du système dû à des erreurs de manipulation. Tout d'abord, l'élément chauffant est un matériau céramique fragile et doit être manipulé avec précaution pendant le transport et l'installation. Il est strictement interdit de le heurter, de le plier ou de l'impacter sous l'effet de la gravité. En particulier, lors du serrage de la pince d'électrode, il convient de ne pas utiliser de couple excessif afin d'éviter que la concentration de contraintes locales ne provoque des fissures dans l'élément.

Deuxièmement, la surface du composant doit être maintenue propre, en particulier la partie chauffante. Il est strictement interdit de le mettre en contact avec de la graisse, de l'humidité ou des impuretés afin de ne pas altérer sa résistance à l'oxydation à haute température. Les opérateurs doivent porter des gants isolants propres pour éviter toute contamination artificielle de la surface du composant pendant toute la durée de l'installation. De plus, la connexion entre l'électrode et le fil doit assurer un bon contact et un serrage uniforme afin d'éviter toute ablation des extrémités ou température anormale due à une résistance de contact excessive. Parallèlement, l'espacement entre les composants doit être constant afin d'éviter

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

toute surcharge et brûlure de certains composants due à un champ thermique irrégulier ou à une variation de courant. De plus, une attention particulière doit être portée à la température, à l'humidité et à la propreté de l'environnement d'installation. L'intérieur du four doit être exempt de poussière et d'eau. En cas d'environnement humide, il doit être parfaitement séché afin d'éviter toute panne ou tout dommage à l'isolation causés par la vapeur d'eau lors d'un fonctionnement à haute température.

6.4 Spécifications de fonctionnement de sécurité

Pour garantir le fonctionnement sûr et stable du système d'éléments chauffants MoSi_2 , les opérateurs doivent respecter strictement les règles de sécurité suivantes : Avant la mise sous tension, vérifiez que tout le câblage est correct, que l'isolation est en bon état et que le système de commande fonctionne normalement. Portez des gants isolants, des lunettes de protection et des vêtements de protection lors de l'utilisation de l'équipement. Il est strictement interdit de toucher les pièces à haute température ou les structures sous tension à mains nues. Le composant doit être chauffé lentement afin d'éviter tout choc thermique dû à une mise sous tension soudaine. En particulier lors de la première utilisation ou du redémarrage après une longue période d'inactivité, une méthode de chauffage progressive doit être utilisée pour permettre au composant de s'adapter progressivement à l'environnement thermique. Il est strictement interdit d'ouvrir la porte du four ou de toucher la surface des composants sans autorisation pendant le fonctionnement. L'inspection ou l'observation doit être effectuée après la mise hors tension et un refroidissement suffisant. En cas d'anomalie (étincelles, arcs, bruits anormaux, rougeurs locales, etc.), couper l'alimentation et vérifier immédiatement. Tout fonctionnement forcé est strictement interdit. Lors du remplacement de composants ou de fixations d'électrodes, l'alimentation principale doit d'abord être coupée et la tension résiduelle doit être confirmée pour être libérée afin de garantir que l'environnement de fonctionnement est dans un état totalement sûr. Vérifier régulièrement si le câblage électrique est desserré, si les pinces vieillissent et s'il y a une accumulation de carbone ou de poussière dans le four est une mesure importante pour garantir un fonctionnement sûr à long terme.

6.5 Guide des pannes courantes et de maintenance

Pendant l'utilisation, les défauts typiques suivants peuvent survenir dans l'élément chauffant en disiliciure de molybdène, et le personnel de maintenance doit avoir un jugement de base et des capacités de traitement :

Brûlure d'extrémité : se manifeste généralement par une fusion ou un noircissement local de la Connexion de l'électrode. Les causes possibles incluent une résistance de contact excessive, une décharge d'arc ou des câbles mal fixés. Vérifiez que la pince est bien serrée, que la surface de contact est propre et remplacez les pièces brûlées comme il se doit.

Fissures superficielles : Principalement causées par un choc thermique ou une contrainte mécanique. Les recommandations d'entretien comprennent l'ajustement de la vitesse de chauffe, l'optimisation de la structure de support et l'inspection régulière des composants pour détecter d'éventuelles microfissures.

Chauffage irrégulier : peut être dû à un espacement irrégulier des composants, à une distribution

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

électrique inégale ou à une dégradation des performances de chaque composant. La zone de chauffage doit être réorganisée et la valeur de résistance de chaque groupe de composants doit être testée.

Rupture de composant : souvent causée par une mauvaise manipulation, une force d'installation inégale ou une surcharge prolongée. Les enregistrements d'opération doivent être examinés pour vérifier l'absence d'interférences externes et remplacer les composants par de nouveaux. **Échec au démarrage** : Si le système ne chauffe pas normalement, cela peut être dû à une défaillance du circuit, à un module de contrôle d'alimentation anormal ou à un composant endommagé. Vérifiez l'entrée d'alimentation, le contact de l'électrode et la sortie de contrôle un par un. Pour prolonger la durée de vie des composants, il est recommandé d'effectuer une inspection de routine hebdomadaire, notamment pour vérifier la solidité de la connexion des électrodes, la propreté du four et la normalité de la montée en température. Pour les équipements fonctionnant à haute fréquence, une maintenance complète doit être effectuée tous les trimestres et les paramètres de fonctionnement doivent être enregistrés pour une analyse des tendances à long terme.

6.5.1 Causes et solutions en cas de rupture d'un élément chauffant

En disiliciure de molybdène (MoSi_2) sont un mode de défaillance fréquent lors d'un fonctionnement à haute température, affectant directement la stabilité de fonctionnement et l'efficacité de la production des équipements. La rupture est principalement causée par des facteurs tels que les contraintes thermiques, les contraintes mécaniques, les défauts de matériau et les mauvaises conditions de fonctionnement. En tant que composé intermétallique, le MoSi_2 présente une dureté élevée mais une faible ténacité à la rupture (environ $2 \text{ à } 3 \text{ MPa} \cdot \text{m}^{1/2}$). Il est facile de former des microfissures et de se dilater sous des contraintes complexes, entraînant une rupture. L'analyse de la cause de la rupture et la mise en place de solutions ciblées peuvent améliorer considérablement la durée de vie du composant, ce qui le rend adapté aux procédés à haute température tels que le frittage de la céramique et la fusion du verre.

Causes de fracture : Concentration de contrainte thermique : L'augmentation et la diminution rapides de la température provoquent un gradient de température excessif dans la zone de transition entre l'extrémité chaude et l'extrémité froide. La différence de coefficient de dilatation thermique (environ $8,1 \times 10^{-6} \text{ K}^{-1}$) provoque une contrainte thermique élevée et induit des fissures. Des cycles thermiques fréquents aggravent la propagation des microfissures. Contrainte mécanique : Une installation incorrecte ou des vibrations pendant le fonctionnement provoquent une concentration de contrainte mécanique, en particulier au niveau des coudes des composants en forme de U ou de W. Défauts de matériau : La porosité (densité $< 98 \%$), les impuretés aux joints de grains (telles que Fe, Al) ou une granulométrie inégale pendant le processus de fabrication réduisent la ténacité à la fracture, et les fissures se propagent facilement le long des défauts. Conditions de fonctionnement inappropriées : une densité de puissance excessive entraîne une surchauffe locale et un maintien trop long dans la plage de température « peste » de $400 \text{ à } 700 \text{ }^\circ\text{C}$ génère des oxydes non protecteurs (tels que MoO_3), ce qui affaiblit la résistance du matériau.

Solution : Optimiser la vitesse de chauffage et de refroidissement : contrôler la vitesse de chauffage et de refroidissement à $5\text{-}10 \text{ }^\circ\text{C}/\text{min}$, passer rapidement à $400\text{-}700 \text{ }^\circ\text{C}$ et réduire les contraintes thermiques.

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

Utiliser une alimentation à commande proportionnelle (tension 20-100 V) pour obtenir une courbe de température régulière et réduire la concentration de contraintes dans la zone de transition entre l'extrémité chaude et l'extrémité froide. Améliorer la conception de l'installation : utiliser des supports en alumine de haute pureté pour correspondre aux caractéristiques du MoSi₂ afin de réduire les contraintes mécaniques. Les pinces sont modérément serrées pour éviter un serrage excessif ou les vibrations. Les composants de type W sont préférés pour les grands fours en raison de leur répartition plus uniforme des contraintes due à la conception à extrémités chaudes multiples. Améliorer la qualité des matériaux : utiliser le frittage par pressage à chaud (densité $\geq 98\%$) et la modification du dopage (par exemple, Y₂O₃, 0,1-1 % en poids) pour optimiser la résistance des joints de grains, contrôler la taille des grains et réduire les pores et les impuretés. Le polissage de surface réduit les points d'amorçage des fissures. Français Normaliser les conditions de fonctionnement : maintenir une densité de puissance de 15-20 W/cm², contrôler l'atmosphère oxydante et éviter les environnements réducteurs ou à forte humidité qui endommagent le film de SiO₂. Calibrer régulièrement le thermocouple (précision $\pm 1^\circ\text{C}$) et le système d'alimentation pour éviter une surchauffe locale. Revêtement de surface : Appliquer un revêtement SiC ou Al₂O₃ pour améliorer la résistance aux chocs thermiques et la résistance mécanique et réduire la propagation des fissures. Le revêtement CVD est plus efficace grâce à sa forte adhérence (charge critique du test de rayure $> 3\text{ kg}$).

Suggestions de mise en œuvre : L'analyse des ruptures par fracture doit être combinée à un MEB (grossissement 50-200 $\times$) pour observer la morphologie des fissures et à une analyse DRX de la composition des phases afin de déterminer la cause de la fracture. Le nombre de cycles thermiques et les variations de puissance pendant le fonctionnement doivent être enregistrés afin d'établir un modèle de prévision de la durée de vie. L'optimisation des paramètres de conception et de fonctionnement peut réduire le risque de fracture de 30 à 50 % et prolonger la durée de vie des composants en MoSi₂ à plus de 5 000 heures.

6.5.2 Causes du décollement de la couche d'oxyde et traitement de régénération

Le film protecteur SiO₂ des éléments chauffants MoSi₂ est essentiel à leur résistance à l'oxydation en atmosphère oxydante. Le décollement expose le substrat, accélère la dégradation par oxydation et réduit considérablement la durée de vie. Le décollement de la couche d'oxyde est principalement dû aux contraintes thermiques, aux défauts de revêtement, à l'environnement d'exploitation et au vieillissement à long terme. Tester et traiter le problème de décollement de la couche d'oxyde permet de restaurer efficacement les performances des composants et est adapté aux environnements oxydants à haute température tels que la fabrication de semi-conducteurs et le frittage de céramique.

Causes de pelage : Contrainte thermique : Une augmentation et une diminution rapides de la température ou des cycles thermiques fréquents provoquent une différence de coefficients de dilatation thermique entre le film SiO₂ et le substrat MoSi₂, ce qui produit une contrainte de cisaillement élevée, provoquant la fissuration ou le décollement de la couche de film. Défauts de revêtement : Une épaisseur de revêtement de surface inégale ou une adhérence insuffisante (charge critique du test de rayure $< 2\text{ kg}$) entraîne un pelage local, détruisant l'intégrité du film SiO₂. Les défauts de fabrication (tels que les pores ou les fissures) augmentent le risque de pelage. Impact de l'environnement d'exploitation : Une humidité

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

élevée (humidité > 70 %) ou une atmosphère corrosive provoque l'hydratation ou la corrosion chimique du film SiO_2 , réduisant l'adhérence. L'oxydation par « peste » à 400-700 °C génère du MoO_3 non protecteur, détruisant la structure du film. Vieillesse à long terme : à 1800°C, proche de la limite d'utilisation du MoSi_2 , le Si se volatilise et provoque l'amincissement du film SiO_2 , et la couche de film se fissure ou se décolle après un fonctionnement à long terme.

Méthode de traitement de régénération : Nettoyer la surface : Après l'arrêt du four, utiliser une brosse douce ou de l'air comprimé pour éliminer les oxydes détachés dans la zone de pelage. Si nécessaire, le laver légèrement avec une solution acide diluée (pH 4-5) et le sécher soigneusement pour éviter les substances corrosives résiduelles. Régénération à haute température : Fonctionner à 1500-1600°C dans une atmosphère oxydante pendant 2 à 4 heures pour favoriser la régénération du film de SiO_2 . Passer rapidement à 400-700°C pour éviter l'oxydation par « peste ». Recouvrement : Utiliser la projection plasma ou la technologie CVD pour recouvrir le SiC ou l' Al_2O_3 dans les zones fortement pelées afin de garantir une épaisseur uniforme. Le revêtement CVD est plus adapté aux scénarios à forte demande en raison de sa densité élevée. Optimiser les paramètres de fonctionnement : Réduire la vitesse de chauffage et de refroidissement à 5-10°C/min, contrôler la densité de puissance à 15-20 W/cm² et éviter la surchauffe locale. Utilisez une alimentation à commande proportionnelle et des thermocouples précis (précision de ± 1 °C) pour maintenir un champ thermique stable. Améliorez le contrôle environnemental : maintenez une atmosphère oxydante dans le four et contrôlez strictement l'humidité et la teneur en gaz corrosifs. Vérifiez régulièrement l'étanchéité du four pour éviter toute pénétration d'humidité ou de contaminants.

Suggestions de mise en œuvre : Pour l'analyse du pelage, la morphologie du film doit être observée par MEB et la composition chimique doit être analysée par EDS afin de déterminer le mécanisme de pelage. Après régénération, la résistivité et le taux de perte de masse doivent être testés (balance de précision, précision $\pm 0,1$ mg) pour vérifier l'effet de récupération du film de SiO_2 .

6.5.3 Méthodes d'entretien quotidien des éléments chauffants

En MoSi_2 sont essentiels pour prolonger la durée de vie, assurer un fonctionnement stable et réduire les coûts de maintenance. La maintenance vise à préserver l'intégrité du film de SiO_2 , à prévenir les dommages dus aux contraintes et à maintenir un environnement de four propre, adapté aux applications à haute température telles que la céramique, le verre et les semi-conducteurs. Des méthodes de maintenance standardisées peuvent réduire les risques de défaillances telles que les fractures, le décollement de la couche d'oxyde et les variations de résistivité.

Méthode d'entretien : Vérifiez régulièrement l'état de surface : Après toutes les 500 à 1 000 heures de fonctionnement, arrêtez le four pour vérifier la surface de l'élément MoSi_2 (extrémité chaude et extrémité froide) et utilisez un microscope optique pour observer l'intégrité du film de SiO_2 , les fissures ou les signes de pelage. Brossez doucement pour enlever la poussière et enregistrez les zones anormales pour évaluer la durée de vie. Nettoyez le four : Nettoyez le four tous les mois ou tous les 100 cycles thermiques, en utilisant de l'air comprimé ou une brosse douce pour éliminer les oxydes, les impuretés métalliques (telles que Fe_2O_3) ou les dépôts volatils (tels que les composés de métaux alcalins) afin d'éviter la

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

contamination du film de SiO_2 ou la corrosion. Contrôlez les conditions de fonctionnement : Maintenez une atmosphère oxydante et passez rapidement à 400-700 °C pour éviter l'oxydation par « peste ». Surveillez la densité de puissance et la température de l'extrémité froide pour éviter la surchauffe ou la dérive de la résistivité. Français : Vérifier les connexions électriques : Vérifier la pince et la connexion d'alimentation toutes les 1000 heures, éliminer les dépôts d'oxyde ou de carbure et assurer un bon contact. Calibrer l'alimentation de commande proportionnelle et le thermocouple (précision $\pm 1^\circ\text{C}$) pour éviter les fluctuations de tension ou les écarts de contrôle de température. Entretenir le support et l'installation : Vérifier le support en alumine de haute pureté pour s'assurer qu'il n'y a pas de fissures ou de déformations, et le maintenir adapté à la dilatation thermique du MoSi_2 . Ajuster le serrage de la pince pour éviter la concentration de contraintes mécaniques et lubrifier régulièrement les connecteurs (utiliser un lubrifiant haute température). Enregistrer les données de fonctionnement : Établir un journal d'opération pour enregistrer le nombre de cycles thermiques, les courbes de température, la densité de puissance et les variations de résistivité (mesurées par la méthode des quatre sondes). Prédire la durée de vie grâce à l'analyse des données (comme le modèle de Weibull) et remplacer les composants vieillissants à l'avance. Protection du revêtement de surface : Si un revêtement SiC ou Al_2O_3 est utilisé, vérifier régulièrement l'intégrité du revêtement et appliquer une nouvelle couche (CVD ou projection plasma) si nécessaire. Évitez les rayures mécaniques ou la corrosion chimique (comme les nettoyants acides) qui pourraient endommager le revêtement.

Suggestions de mise en œuvre : Élaborer un plan de maintenance et former les opérateurs à sa mise en œuvre standardisée. Utiliser le MEB et l'EDS pour analyser les échantillons défectueux et optimiser les stratégies de maintenance. Contrôler rigoureusement l'atmosphère et la propreté du four, et optimiser la disposition des composants en combinaison avec la simulation du champ thermique afin de réduire les coûts de maintenance de 20 à 30 % et de garantir la stabilité des composants MoSi_2 pendant plus de 5 000 heures à 1 500 °C. Veiller à la sécurité lors de la maintenance. Après l'arrêt du four, attendre que la température redescende à température ambiante et débrancher l'alimentation électrique pour éviter tout choc électrique ou brûlure.

6.5.4 Technologie de remplacement et de recyclage des éléments chauffants

Le remplacement des éléments chauffants est essentiel au bon fonctionnement du système de chauffage MoSi_2 . Avec l'augmentation de la durée d'utilisation, les éléments se dégradent, voire se cassent, en raison de facteurs tels que la fatigue thermique, l'oxydation ou les dommages mécaniques. Ils doivent être remplacés à temps pour éviter toute panne de l'équipement et toute interruption de la production. Lors du remplacement, les procédures d'exploitation doivent être scrupuleusement respectées afin de garantir la sécurité et la qualité de l'installation.

Avant tout remplacement, débranchez l'alimentation du four et attendez que les composants refroidissent à une température sûre afin d'éviter les brûlures et les dommages secondaires causés par les contraintes thermiques. Évitez les tractions violentes et les collisions lors du démontage, et séparez délicatement les composants et les fixations des électrodes afin de ne pas endommager la structure environnante. Les anciens composants démontés doivent être triés et stockés en vue de leur recyclage et de leur réutilisation.

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

Les technologies de recyclage et de réutilisation sont essentielles pour l'application des éléments chauffants en disiliciure de molybdène. Les matériaux à base de disiliciure de molybdène sont eux-mêmes d'une grande valeur. Le recyclage permet non seulement de réduire les coûts, mais s'inscrit également dans une démarche de protection de l'environnement. Les procédés de recyclage courants incluent la collecte des composants usagés, le broyage mécanique, le traitement chimique et la purification des matériaux. L'élimination de la couche d'oxyde et des impuretés permet d'extraire des éléments en molybdène et en silicium de haute pureté pour la préparation de nouveaux éléments chauffants ou d'autres matériaux à base de molybdène.

De plus, certains composants légèrement oxydés et intacts peuvent continuer à être utilisés après nettoyage de surface et régénération de la couche d'oxyde, prolongeant ainsi leur durée de vie. Les technologies de recyclage avancées incluent également la réduction sous vide, le pressage isostatique à chaud et d'autres procédés pour optimiser la restauration des propriétés des matériaux. Les entreprises doivent mettre en place un système de recyclage complet, doté d'équipements et de techniciens spécialisés, afin de garantir un processus de recyclage sûr et efficace.

6.6 Méthodes d'installation typiques dans les fours industriels

Il existe différentes manières d'installer des éléments chauffants en MoSi_2 dans les fours industriels. Ils sont généralement conçus en fonction de la structure du four, des exigences du procédé et des spécifications des éléments, afin d'obtenir un chauffage uniforme, un rendement élevé et une maintenance aisée. Voici quelques méthodes d'installation courantes :

Installation suspendue : Ce type d'installation est courant dans les fours à atmosphère contrôlée et les fours à vide. L'élément chauffant est suspendu au sommet ou sur les deux côtés du four et fixé à l'aide de supports isolants afin de garantir sa libre dilatation et d'éviter tout contact avec les parois du four ou d'autres éléments. Cette méthode est pratique pour le remplacement et la maintenance des éléments et convient aux conditions de travail nécessitant un remplacement rapide.

Installation encastrée : L'élément chauffant est directement intégré au matériau réfractaire ou au support en céramique du four pour former une structure de support stable. Cette méthode est stable et moins sensible aux chocs mécaniques, et convient aux fours industriels fonctionnant en continu à haute température. L'inconvénient est que le remplacement est plus complexe et nécessite le démontage d'une partie du matériau réfractaire.

Installation fixe par support : Utilisez des supports spéciaux en métal ou en céramique pour fixer les éléments chauffants à différents endroits du four, comme en bas, sur les parois latérales ou en haut. La conception des supports doit tenir compte de la dilatation thermique et des performances d'isolation afin de garantir une sollicitation uniforme des éléments. Cette méthode, adaptée aux grands fours industriels, permet une disposition précise et une répartition optimale du champ thermique.

Installation à plat : Posez les composants à plat sur une surface chauffante, comme une plaque ou une plateforme chauffante, couramment utilisée dans les fours plats et les fours de recuit. L'installation à plat

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

permet une distribution uniforme de la chaleur, mais nécessite que les composants soient bien plats et soutenus pour éviter toute flexion ou déformation.

Installation de la bobine : Les éléments chauffants sont disposés en spirale ou en bobine, ce qui convient aux fours cylindriques ou verticaux. Cette méthode permet de gagner de la place, d'augmenter la surface de chauffe et de faciliter le réglage de la densité de puissance.

Dans les applications pratiques, plusieurs méthodes d'installation sont souvent combinées pour répondre aux besoins de processus complexes. La conception doit tenir pleinement compte des caractéristiques de dilatation thermique des composants, des exigences d'isolation électrique, de la facilité d'installation et de retrait, ainsi que des facteurs environnementaux tels que le type d'atmosphère et le gradient de température. De plus, lors de l'installation, assurez-vous que l'élément chauffant est correctement connecté à l'alimentation électrique et bien isolé afin d'éviter les fuites et les surchauffes locales. Vérifiez régulièrement l'état de l'installation et ajustez les supports et les colliers à temps pour garantir un champ thermique uniforme et stable dans le four, améliorant ainsi l'efficacité de chauffage et la durée de vie de l'élément.



CTIA GROUP LTD Tige de silicium-molybdène

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

CTIA GROUP LTD
MoSi₂ Heating Element Introduction

1. Overview of MoSi₂ Heating Element

Molybdenum disilicide (MoSi₂) heating elements are high-performance ceramic electric heating materials widely used in industrial furnace applications. In high-temperature oxidizing atmospheres, MoSi₂ forms a dense silica (SiO₂) protective layer on its surface, which effectively prevents further oxidation. It exhibits excellent oxidation resistance and thermal stability, allowing stable operation under high temperatures for extended periods.

2. Features of MoSi₂ Heating Element

Low thermal expansion coefficient: Well-matched with common ceramic substrates, minimizing the risk of cracking caused by thermal stress.

Excellent oxidation resistance: Forms a dense SiO₂ protective film on the surface, effectively preventing material degradation from oxidation.

Extremely high working temperature: Capable of continuous operation up to 1700°C, and a maximum usage temperature of 1800°C in oxidizing atmospheres.

Good high-temperature electrical resistance characteristics: MoSi₂ exhibits relatively stable resistivity at high temperatures, with only a gradual increase in resistivity at elevated temperatures.

3. Specifications of MoSi₂ Heating Element

Model (d1/d2)	Hot End Diameter (d1)	Cold End Diameter (d2)	Hot Zone Length (Le)	Cold Zone Length (Lu)	Common Types
φ3/6	3 mm	6 mm	100–300 mm	150–250 mm	Straight / U-type
φ4/9	4 mm	9 mm	100–500 mm	200–300 mm	Straight / U-type
φ6/12	6 mm	12 mm	100–600 mm	200–350 mm	Straight / U-type / W-type
φ9/18	9 mm	18 mm	150–800 mm	250–400 mm	Straight / U-type / W-type
φ12/24	12 mm	24 mm	200–1000 mm	300–500 mm	Straight / U-type / W-type

4. Typical Applications of MoSi₂ Heating Element

High-temperature sintering furnaces in the ceramics and powder metallurgy industries

Heat treatment equipment for steel and non-ferrous metals

High-temperature laboratory furnaces

Diffusion, annealing, and oxidation processes in the semiconductor and photovoltaic industries

5. Purchasing Information

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

Website: www.molybdenum.com.cn

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 Normes d'essai et certification des éléments chauffants en MoSi₂

7.1 Méthode d'essai des performances de l'élément chauffant

MoSi₂ jouent un rôle essentiel dans la garantie de leur qualité et de leur fiabilité, en déterminant plusieurs indicateurs clés, notamment les propriétés électriques, mécaniques, thermiques et la durabilité. Le test de performance électrique consiste principalement à déterminer la valeur de résistance et le coefficient de température de l'élément. Grâce à des instruments de mesure de résistance de précision, la variation de résistance de l'élément est testée dans différents environnements de température afin d'évaluer la stabilité et la constance de ses performances électriques. L'uniformité et la variation linéaire de la résistance sont essentielles à la conception et à l'utilisation des éléments chauffants.

Les essais de propriétés mécaniques comprennent principalement des essais de dureté et de flexion. Ces essais utilisent généralement des duromètres Vickers ou Rockwell pour mesurer les variations de dureté des composants sous l'effet du chauffage et du refroidissement, reflétant ainsi la résistance mécanique et la résistance à l'usure du matériau. L'essai de flexion applique une contrainte mécanique pour observer la capacité de déformation élastique et le point de rupture du composant afin d'évaluer sa résistance aux dommages mécaniques.

Les tests de performance thermique comprennent la détermination du coefficient de dilatation thermique et la stabilité thermique. Le test du coefficient de dilatation thermique utilise un instrument de mesure de la dilatation thermique pour mesurer la variation de longueur du composant pendant le processus de chauffage afin de garantir un espace de dilatation thermique suffisant lors de la conception pour éviter les dommages causés par les contraintes thermiques. Le test de stabilité thermique utilise un chauffage continu à haute température pour observer la résistance, la morphologie et les modifications structurales du composant afin d'évaluer sa stabilité à long terme dans un environnement à haute température.

De plus, les tests de résistance à l'oxydation constituent un indicateur important pour évaluer la durée de vie des éléments chauffants en MoSi₂. Des expériences de chauffage à long terme dans un environnement d'oxydation simulé permettent de détecter la formation, l'épaisseur et le décollement du film d'oxyde afin de déterminer la résistance à l'oxydation de l'élément. L'analyse des modes de défaillance combine l'analyse des fractures et les tests de microstructure pour identifier les faiblesses potentielles et les mécanismes de défaillance des éléments chauffants.

Ces méthodes de test se complètent et reflètent de manière exhaustive le niveau de performance des éléments chauffants en disiliciure de molybdène, fournissant une base scientifique et une garantie technique pour la production et l'application.

7.2 Analyse des normes ISO, ASTM et autres

L'Organisation internationale de normalisation (ISO) et l'American Society for Testing and Materials (ASTM) ont développé un certain nombre de normes pour les éléments chauffants et les matériaux

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

associés, couvrant des aspects tels que la qualité des produits, les méthodes d'essai et les réglementations de sécurité, qui jouent un rôle clé pour garantir la qualité et les performances des éléments chauffants MoSi₂. En termes de normes ISO, les principales normes relatives aux éléments chauffants en MoSi₂ comprennent l'analyse de la composition des matériaux, la tolérance dimensionnelle, les essais de propriétés mécaniques et les essais d'adaptabilité environnementale. Par exemple, la norme ISO 9001 relative au système de gestion de la qualité garantit l'amélioration systématique et continue du contrôle qualité tout au long du processus de production. La série ISO 22007 porte sur les méthodes d'essai de dilatation thermique des matériaux, servant de référence pour la conception et l'utilisation. Les normes ISO relatives aux céramiques électroniques et aux matériaux résistants aux hautes températures couvrent l'évaluation des propriétés électriques et thermiques.

Les normes ASTM ont une longue histoire et sont largement utilisées dans le domaine des essais de matériaux. La norme ASTM E1131 spécifie une procédure générale d'analyse thermique des matériaux, adaptée à la détermination de la stabilité thermique et du comportement au changement de phase des composants en MoSi₂. La norme ASTM E384 couvre les méthodes d'essai de microdureté et est largement utilisée pour l'évaluation de la dureté. La norme ASTM E1820 fournit des recommandations pour les essais de ténacité à la rupture afin de faciliter l'analyse du comportement à la rupture des composants. Il existe également des normes telles que l'ASTM B193 pour la mesure de la résistivité des matériaux métalliques afin de garantir la précision des essais de performance électrique. De plus, l'ISO et l'ASTM disposent de directives correspondantes concernant les spécifications de sécurité et les exigences de performance des éléments chauffants des fours industriels, comme la série de normes de sécurité électrique CEI 60519, qui couvre la sécurité de conception et de fonctionnement des équipements de chauffage électrique haute température. Ces normes sont d'une importance capitale pour les fabricants qui souhaitent concevoir des éléments chauffants en MoSi₂ conformes aux exigences du marché international.

Dans les applications concrètes, les entreprises combinent souvent les normes ISO et ASTM pour développer des processus de test internes afin de garantir que les produits répondent aux normes internationales et aux besoins spécifiques des clients. L'étalonnage des équipements de test et la certification des opérateurs sont également généralement réalisés conformément aux normes pertinentes afin d'améliorer la fiabilité et l'autorité des résultats de test.

7.3 Test d'adaptabilité environnementale

Les essais d'adaptabilité environnementale sont essentiels pour évaluer la stabilité des éléments chauffants en disiliciure de molybdène dans divers environnements de travail. Ce type d'essai simule principalement les performances des éléments chauffants dans différentes conditions telles que la température, l'humidité, la composition de l'atmosphère et les vibrations mécaniques. Tout d'abord, l'essai de cycle à haute température détecte l'influence des contraintes thermiques causées par la dilatation et la contraction thermiques de l'élément sur la structure et les performances du matériau suite à des chauffages et refroidissements répétés, et vérifie sa résistance à la fatigue thermique. L'essai en environnement humide simule une utilisation dans des conditions d'humidité élevée, observe la stabilité de la couche d'oxyde à la surface de l'élément et si les propriétés électriques sont affectées, et garantit que l'élément chauffant ne présentera pas de défaillance d'isolation ni de corrosion en milieu humide. De plus, l'essai

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

d'adaptabilité à l'atmosphère simule le comportement de l'élément chauffant en atmosphère oxydante, réductrice ou inerte. En contrôlant la composition de l'atmosphère du four, le taux d'oxydation et les performances antioxydantes de l'élément chauffant dans différentes atmosphères sont examinés afin de garantir sa bonne durée de vie dans des conditions de travail complexes. L'essai de vibration mécanique et d'impact vérifie si l'élément et sa structure de montage peuvent résister aux dommages mécaniques causés par les vibrations pendant le transport et le fonctionnement.

Les tests d'adaptabilité environnementale peuvent refléter pleinement la fiabilité des éléments chauffants dans les applications réelles, fournir une base scientifique pour la sélection, la conception et la maintenance des matériaux et réduire le risque de défaillance causé par des facteurs environnementaux.

7.4 Modes de défaillance et méthodes de prédiction de la durée de vie

L'analyse des modes de défaillance est essentielle pour comprendre le mécanisme d'endommagement des éléments chauffants en MoSi₂ et prolonger leur durée de vie. Les modes de défaillance courants incluent la fissuration par fatigue thermique, le décollement de la couche d'oxyde, la fracture due à une contrainte mécanique et l'ablation locale. L'observation macroscopique et l'analyse microstructurale des composants défaillants permettent de déterminer la position initiale et le chemin d'expansion des fissures, et d'évaluer les modifications du matériau avant la défaillance, telles que la présence de gros grains, l'augmentation des pores et l'épaisseur anormale de la couche d'oxyde.

La prédiction de durée de vie utilise généralement des tests de durée de vie accélérés combinés à des modèles théoriques. Ces tests reproduisent rapidement le processus d'endommagement que les composants peuvent subir lors d'une utilisation prolongée en augmentant la température de fonctionnement, le nombre de cycles thermiques ou la charge mécanique, et collectent des données de défaillance. À partir de ces données, combinées aux théories pertinentes de la mécanique de la rupture, de la thermodynamique et de la science des matériaux, un modèle mathématique est établi pour prédire la durée de vie des éléments chauffants en conditions normales de fonctionnement. Parmi les modèles couramment utilisés figurent le modèle d'activation thermique d'Arrhenius et le modèle de fatigue de Coffin-Manson. De plus, l'analyse statistique basée sur les données de défaillance, comme la distribution de Weibull, permet d'évaluer la fiabilité et les caractéristiques de répartition de la durée de vie du produit. Grâce à la prédiction de durée de vie, les fabricants peuvent optimiser la conception des composants et le choix des matériaux, tout en fournissant aux utilisateurs des recommandations raisonnables en matière de cycles de maintenance et de remplacement afin de réduire les taux de défaillance et les coûts d'exploitation.

7.5 Exigences en matière de sécurité et de code électrique

Les spécifications de sécurité et électriques sont essentielles pour garantir le fonctionnement sûr et stable des éléments chauffants MoSi₂ et de leurs systèmes. La température de fonctionnement de l'élément chauffant est extrêmement élevée et implique des commutations à courant élevé. Les normes de sécurité électrique en vigueur doivent être strictement respectées afin de prévenir les accidents tels que les chocs électriques, les courts-circuits et les incendies. En règle générale, la résistance d'isolement de l'élément

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

chauffant doit atteindre la valeur spécifiée, et son état d'isolement est régulièrement testé en cours d'utilisation afin d'éviter les fuites dues au vieillissement de l'isolant.

Les connexions électriques doivent utiliser des bornes, des matériaux isolants et des procédés de connexion conformes aux normes nationales ou internationales afin de garantir un bon contact et une résistance mécanique et thermique suffisante. Le système de mise à la terre doit être conçu de manière à réduire efficacement le risque de choc électrique. Le système d'alimentation électrique doit être équipé de dispositifs de protection contre les surcharges, les fuites et les courts-circuits afin de couper l'alimentation à temps en cas de circonstances anormales et de garantir la sécurité du personnel et des équipements. De plus, le personnel d'installation et de maintenance doit respecter les procédures de sécurité et être équipé des équipements de protection nécessaires. Des panneaux d'avertissement et des dispositifs d'isolation doivent être installés dans les zones de travail à haute température afin d'éviter tout contact accidentel et toute brûlure. Les certifications de sécurité des équipements et composants concernés, telles que les certifications CE et UL, contribuent également à l'accès au marché et à l'assurance de la sécurité.



CTIA GROUP LTD Tige de silicium-molybdène

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

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

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

Chapitre 8 Application des éléments chauffants MoSi₂

8.1 Application des éléments chauffants MoSi₂ dans l'industrie métallurgique

En disiliciure de molybdène (MoSi₂) sont largement utilisés dans la fusion des métaux, le traitement thermique et le frittage à haute température dans l'industrie métallurgique, en raison de leurs excellentes performances à haute température, de leur bonne résistance à l'oxydation et de leurs caractéristiques électrothermiques stables. La conductivité thermique, le coefficient de dilatation thermique et la résistivité à coefficient de température positif du MoSi₂ lui permettent d'assurer un chauffage efficace et uniforme, répondant ainsi aux exigences de l'industrie métallurgique en matière de températures élevées, de contrôle précis de la température et de longévité. Les éléments MoSi₂ offrent une excellente résistance à l'oxydation grâce au film protecteur de SiO₂ formé à leur surface en atmosphère oxydante, ce qui les rend adaptés au fonctionnement à long terme des fours métallurgiques. Les structures courantes des éléments MoSi₂ (telles que les types U, W, Φ6/12 ou Φ9/18) peuvent être personnalisées en fonction du type de four et des exigences du procédé. Elles sont largement utilisées dans les fours de fusion des métaux, les fours de traitement thermique et les fours de frittage. L'optimisation de l'application des composants MoSi₂ doit éviter la plage de température « peste » de 400 à 700 °C, augmenter et diminuer rapidement la température pour réduire la génération d'oxydes non protecteurs (un mélange de MoO₃ et SiO₂) et combiner les revêtements de surface (tels que SiC ou Al₂O₃) pour améliorer la résistance aux chocs thermiques et la durée de vie.

Dans l'industrie métallurgique, les éléments chauffants en MoSi₂ présentent des avantages tels qu'une densité de puissance élevée, un contrôle de température stable et une longue durée de vie. Leur flexibilité de conception permet d'utiliser divers types de fours, tels que les fours à caisson, les fours tunnel et les fours à vide, afin de répondre aux besoins de traitement de différents matériaux métalliques. Des supports en alumine haute pureté sont nécessaires à l'installation afin de respecter les caractéristiques de dilatation thermique du MoSi₂ et de réduire les contraintes mécaniques. Les connexions électriques nécessitent l'utilisation de pinces à faible résistance et d'alimentations à commande proportionnelle pour garantir la stabilité opérationnelle. L'utilisation d'éléments en MoSi₂ nécessite également une prise en compte du contrôle de l'atmosphère afin d'éviter les environnements à forte humidité ou à réduction de la température, responsables de la rupture du film de SiO₂ .

8.1.1 Fusion des métaux et traitement thermique

MoSi₂ utilisés dans la fusion et le traitement thermique des métaux sont principalement concentrés dans les fours de fusion à haute température, les fours de recuit et les fours de trempe. Ils sont utilisés pour le traitement de matériaux métalliques tels que l'aluminium, le cuivre, l'acier et les alliages de titane. La fusion des métaux nécessite un contrôle précis de la température du four, entre 1 000 et 1 600 °C. La résistivité à coefficient de température positif des éléments MoSi₂ leur permet d'ajuster la puissance de manière adaptative et de fournir un environnement haute température stable. Les éléments MoSi₂ de type U et de type W sont couramment utilisés dans les fours de fusion de petite et moyenne taille, avec une longueur d'extrémité chaude de 100 à 500 mm et une densité de puissance de 15 à 20 W/cm². Ils peuvent atteindre rapidement le point de fusion (par exemple, 660 °C pour l'aluminium et 1 085 °C pour le cuivre)

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

et maintenir un champ de température uniforme. Dans les procédés de traitement thermique tels que le recuit et la trempe, les éléments en MoSi₂ assurent un chauffage stable à 1 200-1 500 °C, garantissant ainsi l'affinage du grain métallique et l'optimisation des performances. Par exemple, le recuit de l'acier nécessite un maintien à 1 200-1 300 °C, et la conductivité thermique et la résistance aux chocs thermiques des composants en MoSi₂ permettent un chauffage et des cycles thermiques rapides.

MoSi₂ utilisés pour la fusion et le traitement thermique des métaux se distinguent par une résistance élevée à l'oxydation et une longue durée de vie. En atmosphère oxydante, le film protecteur de SiO₂ prévient efficacement la dégradation du matériau, et le taux de perte de masse à 1 500 °C est inférieur à 0,2 mg/cm²/1 000 h. Le revêtement de surface améliore encore la résistance aux chocs thermiques et à la corrosion, et convient aux atmosphères métallurgiques contenant des traces de soufre ou de carbone. Une fois installés, les éléments de type U sont suspendus verticalement ; les éléments de type W sont adaptés au chauffage uniforme des grands fours, et l'extrémité froide est renforcée par un revêtement aluminisé. En fonctionnement, il est nécessaire d'éviter un passage rapide entre 400 et 700 °C afin d'éviter l'oxydation par « peste », et la vitesse de chauffage et de refroidissement est contrôlée à 5-10 °C/min. La maintenance comprend des inspections régulières de l'intégrité du film de SiO₂ et de l'état de connexion de l'extrémité froide, ainsi que le nettoyage des impuretés du four (comme l'oxyde de fer) pour éviter toute contamination. La limitation des éléments MoSi₂ réside dans la nécessité d'abaisser la température de fonctionnement en milieu réducteur ou sous vide pour éviter la défaillance du film de SiO₂. Dans les applications pratiques, l'optimisation de la disposition des composants, combinée à la simulation du champ thermique, peut améliorer considérablement l'efficacité et la qualité de la fusion et du traitement thermique des métaux.

8.1.2 Procédé de frittage à haute température

MoSi₂ utilisés dans les procédés de frittage à haute température concernent principalement le frittage de poudres métalliques, de composites céramiques et d'alliages spéciaux. Ils sont couramment utilisés dans la production d'aciers hautes performances, d'alliages à base de titane et de carbures cémentés. Ce procédé nécessite un contrôle précis de la température entre 1 300 et 1 800 °C pour favoriser la densification du matériau et la croissance des grains. Leur densité de puissance élevée et leur contrôle thermique stable en font un choix idéal. Les éléments MoSi₂ de type W et à tige droite sont souvent utilisés dans les grands fours de frittage pour assurer un champ thermique uniforme et conviennent aux pièces de grandes dimensions. Les éléments spiralés (diamètre de l'extrémité chaude : 4 à 9 mm) conviennent aux petits fours tubulaires pour un frittage de haute précision. La conductivité thermique et la résistivité à coefficient de température positif du MoSi₂ assurent une répartition uniforme de la chaleur pendant le frittage et réduisent la déformation et les fissures des pièces.

Lors du frittage à haute température, la résistance à l'oxydation des éléments MoSi₂ constitue un avantage majeur. Le film protecteur SiO₂ reste stable entre 1 500 et 1 800 °C (épaisseur de 10 à 15 μm), avec une perte de masse inférieure à 0,5 mg/cm²/1 000 h, ce qui garantit un fonctionnement à long terme. Un dopage modifié (par exemple, Y₂O₃, 0,1 à 1 % en poids) améliore la résistance aux joints de grains, et un revêtement de surface (par exemple, Al₂O₃, épaisseur de 10 à 50 μm) améliore la résistance aux chocs thermiques et à la corrosion, ce qui est adapté aux atmosphères de frittage contenant des traces

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

d'impuretés volatiles. Une fois installés, les éléments de type W sont supportés horizontalement ou suspendus verticalement, et des supports en alumine haute pureté réduisent les contraintes thermiques. Des pinces en cuivre sont utilisées pour les connexions électriques et des alimentations à commande proportionnelle assurent la stabilité. Pendant le fonctionnement, la température doit être rapidement dépassée entre 400 et 700 °C pour éviter la formation d'oxydes non protecteurs, et la vitesse de chauffage et de refroidissement doit être de 5 à 10 °C/min pour réduire la contrainte thermique (la ténacité à la rupture du MoSi₂ est d'environ 2 à 3 MPa·m^{1/2}).

MoSi₂ utilisés pour le frittage à haute température sont sensibles à l'atmosphère et nécessitent des exigences de maintenance. Les atmosphères de frittage contenant du soufre ou du carbone peuvent corroder le film de SiO₂ ; la pression partielle d'oxygène et l'humidité doivent donc être strictement contrôlées. Une inspection régulière de la surface du composant (observation MEB de la couche de film) et de la température de l'extrémité froide, ainsi que le nettoyage des impuretés du four (comme les oxydes métalliques) peuvent prolonger la durée de vie. L'optimisation du champ thermique (comme la simulation par éléments finis) garantit l'uniformité de la température et réduit les défauts des pièces frittées. Grâce à leurs hautes performances, les composants en MoSi₂ sont largement utilisés dans la production de composants aéronautiques, d'outils de coupe et de matériaux résistants à l'usure dans les procédés de frittage à haute température, afin d'améliorer la qualité des produits et l'efficacité de la production.

8.1.3 Équipement de traitement thermique

En MoSi₂ sont largement utilisés dans les équipements de traitement thermique de l'industrie métallurgique, notamment dans les fours de recuit, de trempe, de normalisation et de revenu, afin d'améliorer les propriétés mécaniques, la résistance à la corrosion et les caractéristiques de mise en œuvre des matériaux métalliques. Ces équipements requièrent un contrôle précis de la température et un champ thermique uniforme pour garantir l'optimisation de la structure du grain métallique et la détente des contraintes. La résistivité à coefficient de température positif des éléments en MoSi₂ leur permet d'assurer un chauffage stable entre 1 200 et 1 500 °C, ce qui les rend adaptés au traitement de matériaux tels que l'acier, les alliages d'aluminium, les alliages de cuivre et les alliages de titane. Les éléments en MoSi₂ en U conviennent aux petits fours de traitement thermique d'une longueur de tête chauffante de 100 à 500 mm, assurant un chauffage centralisé et adaptés à la production en petites séries. Les éléments en W et en forme de tige droite conviennent aux grands fours de traitement thermique continu d'une longueur de tête chauffante de 200 à 1 000 mm, permettant de couvrir une grande surface de chauffe et d'assurer une température uniforme.

MoSi₂ utilisés dans les équipements de traitement thermique se distinguent par leur grande résistance à l'oxydation et leur capacité à supporter des cycles thermiques fréquents. En atmosphère oxydante, le film protecteur SiO₂ assure une stabilité à long terme de l'élément, ce qui permet une conservation durable de la chaleur et des montées et descentes rapides en température lors du traitement thermique. Les revêtements de surface (tels que SiC ou Al₂O₃) améliorent la résistance aux chocs thermiques et à la corrosion, et sont adaptés aux atmosphères métallurgiques complexes. Lors de l'installation, l'élément est fixé par un support en alumine haute pureté, et une suspension verticale ou un support horizontal réduit les contraintes mécaniques. La connexion électrique utilise une pince à faible résistance, et l'alimentation

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

à commande proportionnelle assure un contrôle précis de la température. En fonctionnement, il est nécessaire de dépasser rapidement 400-700 °C pour éviter l'oxydation par fléau, et la vitesse de montée et de descente en température est contrôlée à 5-10 °C/min. La maintenance comprend l'inspection régulière du film SiO₂, la connexion de l'extrémité froide et le nettoyage du four pour éviter la contamination par les impuretés. La limitation des éléments MoSi₂ réside dans la nécessité d'abaisser la température d'utilisation en atmosphère réductrice et de contrôler rigoureusement l'atmosphère du four. L'optimisation du champ thermique et une maintenance régulière garantissent le rendement élevé et la qualité des produits des équipements de traitement thermique, largement utilisés dans les secteurs de l'automobile, de l'aérospatiale et de la fabrication de machines.

8.2 Application des éléments chauffants MoSi₂ dans l'industrie céramique

En MoSi₂ sont largement utilisés dans la cuisson de la céramique, le traitement de l'émaillage et la préparation de matériaux céramiques spéciaux dans l'industrie céramique. Leur température de fonctionnement élevée, leur résistance à l'oxydation et leur stabilité électrothermique répondent aux exigences des procédés céramiques en matière de haute température et de contrôle précis de la température. Les éléments en MoSi₂ maintiennent leur stabilité en atmosphère oxydante grâce à un film protecteur de surface en SiO₂ et conviennent aux fours de cuisson de la céramique, aux fours de cuisson de l'émaillage et aux fours de frittage de céramiques spéciales. Les éléments en MoSi₂ en forme de U, de W et en spirale sont personnalisables selon le type de four. Le modèle en U convient aux petits fours à cuisson, le modèle en W aux grands fours tunnels, et le modèle en spirale au frittage de haute précision dans les fours tubulaires. L'installation est réalisée à l'aide de supports en alumine haute pureté, les connexions électriques à faible résistance et le contrôle précis de la température est assuré par une alimentation à commande proportionnelle. L'opération nécessite un passage rapide à 400-700 °C pour éviter l'oxydation par fléau. La vitesse de chauffage et de refroidissement est de 5 à 10 °C/min, et le revêtement de surface améliore la résistance aux chocs thermiques et la durée de vie. L'utilisation d'éléments MoSi₂ dans l'industrie céramique améliore considérablement la qualité de cuisson et l'efficacité de la production, répondant ainsi aux besoins des céramiques traditionnelles et avancées.

8.2.1 Cuisson et émaillage de la céramique

En MoSi₂ sont utilisés dans les fours à cuisson, les fours à navette et les fours tunnel pour la cuisson et l'émaillage de la céramique. Ils servent à la production de céramiques d'usage courant, architecturales et artistiques. La cuisson de la céramique nécessite un frittage de la pâte crue et une fusion de l'émaillage à une température de 1 000 à 1 400 °C. La résistivité à coefficient de température positif des éléments en MoSi₂ offre un environnement stable à haute température pour assurer la densification des pâtes crues et la brillance des émaux. Les éléments en MoSi₂ en forme de U conviennent aux petits fours, tandis que les éléments en forme de W conviennent aux grands fours à cuisson continue, offrant un champ thermique uniforme pour réduire la fissuration et la déformation de la céramique. L'émaillage nécessite un contrôle précis de la température pour maîtriser la fusion et la cristallisation de l'émaillage. La conductivité thermique des éléments en MoSi₂ permet un chauffage et une isolation rapides. Le film protecteur en SiO₂ reste stable en atmosphère oxydante, et le revêtement de surface améliore la résistance aux chocs thermiques et à la corrosion, ce qui est adapté aux atmosphères de cuisson contenant des émaux volatils.

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

L'installation et l'exploitation nécessitent un contrôle de l'atmosphère et des vitesses de chauffage et de refroidissement, et la maintenance comprend l'inspection régulière de la surface des composants et le nettoyage du four. Les composants MoSi_2 améliorent l'efficacité et la qualité des produits lors des procédés de cuisson et d'émaillage de la céramique et sont largement utilisés dans la production de céramique.

8.2.2 Préparation de matériaux céramiques spéciaux

En MoSi_2 sont utilisés dans les fours de frittage et de pressage à chaud pour la préparation de matériaux céramiques spéciaux. Ils permettent de produire des céramiques avancées telles que l'alumine, la zircone, le nitrure de silicium et le carbure de silicium, et sont largement utilisés dans les secteurs de l'aérospatiale, de l'électronique et de la médecine. Le frittage de céramiques spéciales doit être réalisé à une température de 1 400 à 1 800 °C pour obtenir une densité élevée et d'excellentes performances.

La densité de puissance élevée et la capacité de contrôle précis de la température des éléments en MoSi_2 répondent à ces exigences. Les éléments en MoSi_2 de type W et en spirale conviennent aux fours de frittage de toutes tailles, offrant un champ thermique uniforme et réduisant les défauts de matériau. Le film protecteur et le revêtement de surface en SiO_2 assurent la stabilité des éléments en atmosphère oxydante à haute température, tandis que le dopage modifié améliore la résistance aux chocs thermiques et convient aux cycles thermiques fréquents. Des supports en alumine de haute pureté sont utilisés pour l'installation, les connexions électriques garantissent un contact à faible résistance, et l'atmosphère ainsi que les vitesses de chauffage et de refroidissement sont contrôlées pour éviter l'oxydation par fléau. La maintenance comprend des inspections régulières des composants et de l'état du four pour garantir une fiabilité à long terme.

8.3 Application des éléments chauffants MoSi_2 dans l'industrie photovoltaïque

En disiliciure de molybdène (MoSi_2) sont largement utilisés dans l'industrie photovoltaïque pour la fabrication de plaquettes de silicium et les équipements de production de cellules solaires, en raison de leurs performances à haute température, de leur résistance à l'oxydation et de leur stabilité électrothermique. Les éléments MoSi_2 offrent un contrôle précis de la température et un champ thermique uniforme, répondant ainsi aux exigences de température élevée et d'environnement propre des procédés photovoltaïques. Leur résistance à l'oxydation est assurée par le film protecteur de SiO_2 formé à la surface en atmosphère oxydante, ce qui garantit un fonctionnement longue durée. Les éléments MoSi_2 en forme de U, de W et à tige droite sont personnalisés en fonction du type de four.

Le modèle en U convient aux petits fours, tandis que les modèles en W et à tige droite conviennent aux grands équipements continus. Des supports en alumine haute pureté sont utilisés pour l'installation afin de respecter les caractéristiques de dilatation thermique, des pinces à faible résistance pour les connexions électriques et des alimentations à commande proportionnelle assurent la stabilité. Le fonctionnement doit traverser rapidement la plage de températures de « peste » pour éviter la formation d'oxydes non protecteurs, et les revêtements de surface (tels que SiC ou Al_2O_3) améliorent la résistance aux chocs thermiques et la durée de vie.

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

8.3.1 Procédé à haute température pour la fabrication de plaquettes de silicium

En MoSi_2 sont utilisés dans le processus haute température de fabrication de plaquettes de silicium pour l'étirage du silicium monocristallin, la coulée de lingots de silicium multicristallin et le recuit des plaquettes. Ces procédés nécessitent un environnement à haute température pour fondre les matières premières de silicium, contrôler la croissance cristalline ou éliminer les défauts cristallins. La résistivité à coefficient de température positif des éléments en MoSi_2 assure une chauffe stable. Les éléments en MoSi_2 à tige droite et de type W conviennent aux grands fours monocristallins et aux fours à lingots, couvrant une large zone de chauffe pour assurer l'uniformité du champ thermique. Les éléments de type U conviennent aux petits fours de recuit afin de répondre aux exigences locales en matière de haute température. Le film protecteur de SiO_2 reste stable en atmosphère oxydante, et le revêtement de surface améliore la résistance aux chocs thermiques et à la corrosion, ce qui est adapté à l'environnement propre de fabrication des plaquettes de silicium. Lors de l'installation, l'élément est fixé par un support en alumine de haute pureté, et la connexion électrique assure un contact à faible résistance. L'exploitation nécessite un contrôle de l'atmosphère et des vitesses de chauffage et de refroidissement afin d'éviter les dommages dus à l'oxydation. La maintenance comprend des inspections régulières de la surface des éléments et de la propreté du four. Les éléments MoSi_2 améliorent la qualité cristalline et l'efficacité de la production de plaquettes de silicium et sont largement utilisés en amont de la chaîne industrielle photovoltaïque.

8.3.2 Équipement de production de cellules solaires

En MoSi_2 sont utilisés dans les fours de diffusion, de frittage et de recuit des équipements de production de cellules solaires pour la fabrication de cellules solaires en silicium cristallin et en couches minces. Le procédé de diffusion nécessite une température élevée pour doper le phosphore ou le bore et former une jonction PN. Le procédé de frittage associe des électrodes métalliques à des plaquettes de silicium, et le recuit optimise les performances des cellules. Les éléments en MoSi_2 offrent un contrôle précis de la température et des champs thermiques uniformes pour répondre aux exigences de ces procédés. Les éléments en MoSi_2 en forme de U et en spirale conviennent aux petits fours de diffusion et de recuit, tandis que les éléments en forme de W conviennent aux grands fours de frittage afin d'assurer la stabilité du chauffage sur de grandes surfaces. Le film protecteur et le revêtement de surface en SiO_2 garantissent un fonctionnement durable de l'élément en atmosphère oxydante, et la résistance aux chocs thermiques s'adapte aux cycles thermiques fréquents. L'installation utilise un support en alumine de haute pureté et le raccordement électrique utilise une alimentation à commande proportionnelle pour un contrôle précis de la température. L'opération doit franchir rapidement la plage de températures critique, et la maintenance comprend la vérification du film de SiO_2 et le nettoyage du four pour éviter toute contamination. Les éléments MoSi_2 améliorent l'efficacité et les performances de la production de cellules solaires et sont largement utilisés dans le domaine de la production d'énergie photovoltaïque.

8.4 Application des éléments chauffants MoSi_2 dans l'industrie des semi-conducteurs

En disiliciure de molybdène (MoSi_2) sont largement utilisés dans les procédés à haute température tels que le recuit des plaquettes, les procédés de diffusion et la croissance épitaxiale dans l'industrie des semi-

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

conducteurs, en raison de leurs performances à haute température, de leur résistance à l'oxydation et de leur stabilité électrothermique. Les éléments MoSi₂ offrent un contrôle précis de la température et un champ thermique uniforme, répondant ainsi aux exigences de la fabrication de semi-conducteurs en matière d'environnement propre et de contrôle de température de haute précision.

Ils présentent une excellente résistance à l'oxydation grâce au film protecteur de SiO₂ formé à la surface en atmosphère oxydante, ce qui les rend adaptés à un fonctionnement longue durée. Les éléments MoSi₂ en U, en W et en spirale sont personnalisés en fonction du type de four. Les types en U et en spirale conviennent aux petits fours de haute précision, tandis que le type en W convient aux grands équipements continus. Des supports en alumine haute pureté sont utilisés pour l'installation afin de respecter les caractéristiques de dilatation thermique du MoSi₂ et de réduire les contraintes mécaniques. Des pinces à faible résistance sont utilisées pour les connexions électriques, et des alimentations à commande proportionnelle assurent la stabilité. Le fonctionnement doit franchir rapidement la plage de températures critique pour éviter la formation d'oxydes non protecteurs. Les revêtements de surface (tels que SiC ou Al₂O₃) améliorent encore la résistance aux chocs thermiques et la durée de vie. Il est important de vérifier régulièrement l'intégrité du film de SiO₂ et l'état de la connexion de l'extrémité froide, de nettoyer le four pour éviter toute contamination par des impuretés et de garantir la fiabilité et l'efficacité des composants de l'industrie des semi-conducteurs.

8.4.1 Processus de recuit et de diffusion des plaquettes

en MoSi₂ sont utilisés dans les fours de recuit thermique rapide (RTA), les fours de diffusion et les fours d'oxydation pour le recuit et la diffusion des plaquettes de silicium et d'autres matériaux semi-conducteurs. Le recuit des plaquettes nécessite des températures élevées pour réparer les défauts de réseau, activer les dopants ou améliorer les propriétés du matériau. Le processus de diffusion forme une jonction PN grâce à un dopage à haute température (comme le phosphore et le bore). La résistivité à coefficient de température positif des éléments en MoSi₂ assure une stabilité de chauffage et un contrôle précis de la température. Les éléments en MoSi₂ en U et en spirale conviennent aux petits fours de recuit et de diffusion, adaptés à la production de petites séries de haute précision, tandis que les éléments en W conviennent aux grands fours de diffusion pour fournir un champ thermique uniforme afin de traiter plusieurs plaquettes.

Le film protecteur en SiO₂ reste stable en atmosphère oxydante, et le revêtement de surface améliore la résistance aux chocs thermiques et à la corrosion, ce qui est idéal pour un environnement de traitement des semi-conducteurs propre. Lors de l'installation, l'élément est fixé par un support en alumine de haute pureté, et la connexion électrique assure un contact à faible résistance. L'opération nécessite une atmosphère et des vitesses de chauffage et de refroidissement contrôlées pour éviter les dommages dus à l'oxydation. La maintenance comprend l'inspection régulière de la surface de l'élément et la propreté du four afin d'éviter toute contamination de la plaquette par des impuretés (telles que des ions métalliques). Les composants MoSi₂ améliorent l'efficacité et la qualité des processus de recuit et de diffusion des plaquettes et sont largement utilisés dans la fabrication de circuits intégrés et de composants de puissance.

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

8.4.2 Croissance épitaxiale des semi-conducteurs

En MoSi₂ sont utilisés dans les fours de dépôt chimique en phase vapeur (CVD) et les équipements d'épithaxie par jets moléculaires (MBE) pour la croissance épithaxiale de semi-conducteurs afin de produire des films monocristallins de haute qualité, tels que le silicium, le germanium et les semi-conducteurs composés (comme le GaAs et le SiC). La croissance épithaxiale nécessite un contrôle précis du champ thermique à haute température pour garantir la qualité cristalline et l'uniformité du film. La densité de puissance élevée et la stabilité de la régulation de température des éléments en MoSi₂ répondent à ces exigences. Les éléments en spirale en MoSi₂ conviennent aux petits fours CVD, offrant un chauffage centralisé pour une croissance de haute précision. Les éléments de type W et à tige droite conviennent aux grands fours épithaxiaux pour garantir l'uniformité du champ thermique des plaquettes de grande surface. Le film protecteur et le revêtement de surface en SiO₂ permettent un fonctionnement à long terme en atmosphère oxydante ou en atmosphères à l'état de traces d'oxygène, et leur résistance aux chocs thermiques s'adapte aux cycles thermiques fréquents. Des supports en alumine haute pureté sont utilisés pour l'installation, et des alimentations à commande proportionnelle assurent les connexions électriques afin d'obtenir un contrôle précis de la température. Le fonctionnement nécessite un passage rapide à la température critique, et la maintenance comprend la vérification du film de SiO₂ et le nettoyage du four pour éviter toute contamination. Les composants MoSi₂ améliorent la qualité et l'efficacité de production des films épithaxiés et sont largement utilisés dans la fabrication de semi-conducteurs.

8.4.3 Équipement de gravure à haute température

En MoSi₂ sont utilisés dans les fours de gravure plasma et les fours de gravure thermique des équipements de gravure haute température pour la structuration des plaquettes de semi-conducteurs. Les procédés de gravure haute température nécessitent un contrôle précis de la température afin d'optimiser la vitesse et la sélectivité de gravure et de garantir la précision des structures micro-nanoscopiques. La résistivité à coefficient de température positif et le champ thermique uniforme des éléments en MoSi₂ répondent à ces exigences. Les éléments en MoSi₂ en U et en spirale conviennent aux petits fours de gravure, fournissant un chauffage centralisé pour des procédés de haute précision, tandis que les éléments en W conviennent aux grands équipements pour assurer la constance de la température de plusieurs plaquettes. Les films protecteurs en SiO₂ restent stables en atmosphère oxydante, et les revêtements de surface (tels que SiC ou Al₂O₃) améliorent la résistance aux chocs thermiques et à la corrosion pour s'adapter aux gaz corrosifs (tels que le chlore ou le fluorure) susceptibles d'être présents pendant la gravure. Lors de l'installation, les éléments sont fixés par des supports en alumine de haute pureté, et des pinces à faible résistance sont utilisées pour les connexions électriques afin d'assurer la stabilité.

Le fonctionnement nécessite un contrôle de l'atmosphère et des vitesses de chauffage et de refroidissement afin d'éviter les dommages dus à l'oxydation. La maintenance comprend l'inspection régulière de la surface des éléments et la propreté du four afin d'éviter toute contamination des plaquettes par des impuretés. Les composants MoSi₂ améliorent la précision et l'efficacité du traitement des équipements de gravure à haute température et sont largement utilisés dans le traitement des microstructures dans la fabrication de semi-conducteurs.

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

8.4.4 Équipement de revêtement sous vide

En MoSi_2 sont utilisés dans les équipements de revêtement sous vide des systèmes de dépôt physique en phase vapeur (PVD) et de dépôt chimique en phase vapeur (CVD) pour déposer des films métalliques, d'oxydes ou de nitrures, tels que TiN , Al_2O_3 , destinés aux électrodes ou aux couches isolantes des dispositifs semi-conducteurs. Le revêtement sous vide nécessite des températures élevées pour évaporer ou décomposer les matériaux précurseurs.

La densité de puissance élevée et le contrôle précis de la température des éléments MoSi_2 garantissent l'uniformité et la qualité du film. Les éléments MoSi_2 en U et en spirale conviennent aux petits fours de revêtement sous vide pour fournir des températures locales élevées et permettre un dépôt de haute précision. Les éléments en W et en tige droite conviennent aux équipements de grande taille pour assurer l'uniformité du champ thermique des substrats de grande surface. En atmosphère oxydante ou en présence de traces d'oxygène, le film protecteur et le revêtement de surface en SiO_2 assurent un fonctionnement durable de l'élément, et la résistance aux chocs thermiques s'adapte aux variations de température rapides.

L'installation utilise un support en alumine de haute pureté et la connexion électrique utilise une alimentation à commande proportionnelle pour assurer une régulation stable de la température. L'opération doit franchir rapidement la plage de température critique afin d'éviter les dommages dus à l'oxydation. La maintenance comprend la vérification du film de SiO_2 et le nettoyage du four pour éviter toute contamination. Les composants MoSi_2 améliorent la qualité du film et l'efficacité de production des équipements de revêtement sous vide et sont largement utilisés dans la préparation de films pour semi-conducteurs.

8.5 Application des éléments chauffants MoSi_2 dans l'industrie de fabrication du verre

En disiliciure de molybdène (MoSi_2) sont largement utilisés dans la fusion et la transformation du verre dans l'industrie verrière en raison de leurs excellentes performances à haute température, de leur résistance à l'oxydation et de leur stabilité électrothermique. Les éléments MoSi_2 offrent un contrôle précis de la température et un champ thermique uniforme, répondant ainsi aux exigences de la fabrication du verre : haute température, fonctionnement durable et environnement propre. Leur excellente résistance à l'oxydation est obtenue grâce au film protecteur de SiO_2 formé à la surface en atmosphère oxydante, adapté aux conditions de fonctionnement difficiles des fours verriers. Les éléments MoSi_2 de type W, U et à tige droite sont personnalisés en fonction du type de four. Le type W convient aux grands fours de fusion pour un chauffage uniforme, tandis que les types U et à tige droite conviennent aux fours de transformation de petite et moyenne taille. Des supports en alumine haute pureté sont utilisés pour l'installation afin de respecter les caractéristiques de dilatation thermique du MoSi_2 et de réduire les contraintes mécaniques. Des pinces à faible résistance sont utilisées pour les connexions électriques, et des alimentations à commande proportionnelle assurent la stabilité. Le fonctionnement doit franchir rapidement la plage de températures critique pour éviter la formation d'oxydes non protecteurs. Les revêtements de surface (tels que SiC ou Al_2O_3) améliorent encore la résistance aux chocs thermiques et la durée de vie. Il est important de vérifier régulièrement l'intégrité du film de SiO_2 et l'état de la

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

connexion de l'extrémité froide, de nettoyer le four pour éviter toute contamination par des impuretés et de garantir la fiabilité et l'efficacité des composants utilisés dans la fabrication du verre.

8.5.1 Fusion du verre

En MoSi₂ sont utilisés dans les grands fours de fusion et les petits fours expérimentaux pour la production de verre plat, de verre optique et de verre spécial. La fusion du verre nécessite des températures élevées pour fondre les matières premières (comme le sable de silice et le carbonate de sodium) en verre liquide uniforme. La résistivité à coefficient de température positif des éléments en MoSi₂ assure un environnement stable à haute température pour garantir la qualité et la régularité de la fusion.

MoSi₂ de type W conviennent aux grands fours de fusion continue, couvrant une large zone de chauffe et fournissant un champ thermique uniforme pour réduire les bulles et les stries dans le verre. Les éléments de type U conviennent aux petits fours de fusion et à la production de petites séries de verre spécial. Le film protecteur de SiO₂ reste stable en atmosphère oxydante, et le revêtement de surface améliore la résistance aux chocs thermiques et à la corrosion pour s'adapter aux composants volatils (tels que les borates) éventuellement présents dans le verre fondu. Lors de l'installation, l'élément est fixé par un support en alumine haute pureté, et la connexion électrique assure un contact à faible résistance. L'opération nécessite une atmosphère et des vitesses de chauffage et de refroidissement contrôlées pour éviter les dommages dus à l'oxydation.

L'entretien comprend l'inspection régulière de la surface de l'élément et la propreté du four afin d'éviter toute contamination du verre fondu par des impuretés (telles que les oxydes de métaux alcalins). Les composants MoSi₂ améliorent l'efficacité de la fusion du verre et la qualité du produit. Ils sont largement utilisés dans la fabrication de verre architectural, automobile et optique.

8.5.2 Traitement du verre

En MoSi₂ sont utilisés dans les fours de recuit, de formage et de bombage à chaud pour le formage, le recuit et le traitement de surface des produits verriers. Le traitement du verre exige un contrôle précis de la température pour éliminer les contraintes internes, façonner le verre ou améliorer ses performances. La densité de puissance élevée et la stabilité de la régulation de température des éléments en MoSi₂ répondent à ces exigences. Les éléments en MoSi₂ en forme de U et de tige droite conviennent aux fours de recuit et de bombage à chaud de petite et moyenne taille, fournissant un chauffage centralisé pour le traitement du verre de formes complexes. Les éléments en forme de W conviennent aux grands fours de formage pour assurer l'uniformité de la température des plaques de verre de grande surface.

En SiO₂ assurent un fonctionnement durable des éléments en atmosphère oxydante, et leur résistance aux chocs thermiques s'adapte aux cycles thermiques fréquents. L'installation est réalisée à l'aide de supports en alumine haute pureté, et les connexions électriques sont assurées par une puissance de commande proportionnelle afin d'obtenir un contrôle précis de la température. Le fonctionnement doit permettre de franchir rapidement la plage de températures critique, et la maintenance comprend la vérification du film de SiO₂ et le nettoyage du four pour éviter toute contamination. Les éléments en MoSi₂ améliorent la

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

précision et l'efficacité du traitement du verre et sont largement utilisés dans la production de contenants en verre, de verre de présentation et de verre architectural.

8.6 Application des éléments chauffants MoSi₂ à la préparation de nouveaux matériaux énergétiques

En disiliciure de molybdène (MoSi₂) jouent un rôle important dans la préparation de nouveaux matériaux énergétiques grâce à leurs excellentes performances à haute température, leur résistance à l'oxydation et leur stabilité électrothermique. Ils sont largement utilisés dans des applications exigeantes telles que le frittage de matériaux pour batteries au lithium, l'hydrogène et les procédés liés aux piles à combustible. Grâce au film protecteur de SiO₂ formé à leur surface en atmosphère oxydante, les éléments MoSi₂ offrent une excellente résistance à l'oxydation , ce qui les rend adaptés à un fonctionnement prolongé à haute température. De plus, leur résistivité à coefficient de température positif assure un contrôle précis de la température et une distribution uniforme du champ thermique. Ces caractéristiques leur permettent de répondre aux exigences d'un environnement propre, d'un contrôle de température de haute précision et d'une résistance aux cycles thermiques lors de la préparation de nouveaux matériaux énergétiques. Les éléments MoSi₂ présentent différentes structures, telles que des structures en U, en W, en spirale et en tige droite, personnalisables selon les besoins des équipements. Les types U et spirale conviennent aux petits fours de frittage de haute précision, tandis que les types W et tige droite conviennent aux grands équipements de production continue. Des supports en alumine haute pureté sont utilisés lors de l'installation pour correspondre aux caractéristiques de dilatation thermique du MoSi₂ et réduire les contraintes mécaniques et la concentration des contraintes thermiques. Des pinces à faible résistance sont utilisées pour les connexions électriques, et un fonctionnement stable est assuré par une alimentation à commande proportionnelle. En fonctionnement, il est nécessaire de franchir rapidement la plage de températures de « maladie » afin d'éviter la formation d'oxydes non protecteurs. Les revêtements de surface (tels que SiC ou Al₂O₃) améliorent encore la résistance aux chocs thermiques et à la corrosion, et prolongent la durée de vie des composants. Une maintenance régulière comprend la vérification de l'intégrité du film de SiO₂ , de l'état des connexions de l'extrémité froide et de la propreté du four afin de garantir l'absence de contamination par des impuretés et de répondre aux exigences strictes de préparation de nouveaux matériaux énergétiques. Les éléments MoSi₂ contribuent de manière fiable à l'amélioration des performances et de l'efficacité de production de nouveaux matériaux énergétiques en optimisant la conception du champ thermique et les paramètres de fonctionnement.

8.6.1 Frittage des matériaux des batteries au lithium

En MoSi₂ sont largement utilisés dans la préparation d'électrodes positives, d'électrodes négatives et d'électrolytes solides pour le frittage des batteries au lithium. Ils permettent de produire des matériaux clés tels que l'oxyde de lithium-cobalt, les matériaux ternaires nickel-cobalt-manganèse, le phosphate de fer-lithium, l'électrode négative en graphite et l'électrolyte à oxyde solide. Le frittage des batteries au lithium doit être réalisé à haute température pour favoriser la croissance cristalline, améliorer la densité du matériau et les propriétés électrochimiques. La densité de puissance élevée et la précision du contrôle de température des éléments en MoSi₂ permettent de répondre à ces exigences élevées. Les éléments en MoSi₂ en U et en spirale conviennent aux petits fours de frittage de laboratoire, au développement de

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

nouveaux matériaux de batterie ou à la production en petites séries, offrant un chauffage centralisé pour garantir une haute précision du processus. Les éléments en W et en tige droite conviennent aux grands fours de frittage industriels, capables de couvrir une large zone de chauffage et de fournir un champ thermique uniforme pour une production à grande échelle. Le film protecteur de SiO_2 reste stable en atmosphère oxydante, garantissant la résistance à l'oxydation des composants pendant le frittage. Le revêtement de surface (tel que SiC ou Al_2O_3) améliore la résistance aux chocs thermiques et à la corrosion, et s'adapte aux gaz volatils ou aux atmosphères corrosives à l'état de traces (comme les composés volatils contenant du lithium) susceptibles d'être présents pendant le frittage. Lors de l'installation, les composants sont fixés par des supports en alumine haute pureté, suspendus verticalement ou horizontalement, afin de réduire les contraintes mécaniques. La connexion électrique utilise une pince à faible résistance et une alimentation à commande proportionnelle permet un contrôle précis de la température. L'opération nécessite un contrôle strict de l'atmosphère du four afin d'éviter la défaillance du film de SiO_2 due à un environnement réducteur ou à une forte humidité, et de franchir rapidement la plage de températures critique pour empêcher la formation d'oxydes non protecteurs. La maintenance comprend l'inspection régulière de l'état de surface des composants, des connexions froides et de la propreté du four, ainsi que l'élimination des impuretés susceptibles d'altérer la pureté des matériaux (comme les oxydes de métaux alcalins). Les composants MoSi_2 optimisent la conception du champ thermique et les paramètres de fonctionnement afin de garantir que les matériaux des batteries au lithium obtiennent une excellente structure cristalline et des propriétés électrochimiques optimales pendant le frittage, améliorant ainsi considérablement la capacité, la durée de vie et la sécurité de la batterie. Ils sont largement utilisés dans les véhicules électriques, les systèmes de stockage d'énergie et l'électronique grand public.

8.6.2 Énergie hydrogène et piles à combustible

En MoSi_2 sont principalement utilisés pour le frittage des matériaux des piles à combustible à oxyde solide (SOFC), la préparation des réacteurs de production d'hydrogène et des composants haute température des électrolyseurs. Ils servent également à produire des électrolytes, des anodes, des matériaux cathodiques et des supports de catalyseurs haute température. La préparation des matériaux pour piles à combustible et énergie hydrogène nécessite un frittage ou un traitement thermique à haute température afin d'optimiser la microstructure et les performances des matériaux. La stabilité des performances à haute température et la distribution uniforme du champ thermique des éléments en MoSi_2 permettent de répondre à ces exigences. Les éléments en MoSi_2 en spirale et en U conviennent aux petits fours expérimentaux, au développement de nouveaux matériaux ou catalyseurs pour piles à combustible, et fournissent des températures locales élevées pour des processus de frittage ou de traitement thermique de haute précision. Les éléments en W et en tige droite conviennent aux grands fours industriels pour la production à grande échelle de composants SOFC ou d'équipements de production d'hydrogène afin de garantir l'uniformité du champ thermique et de réduire les défauts de matériaux.

Le film protecteur SiO_2 offre une protection anti-oxydation fiable en atmosphère oxydante. Le revêtement de surface (tel que Al_2O_3 ou SiC) améliore la résistance aux chocs thermiques et à la corrosion, et s'adapte à l'atmosphère complexe (comme la vapeur d'eau ou les traces de gaz réducteurs) susceptible d'être impliquée dans le frittage des matériaux des piles à combustible. Lors de la préparation des

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

réacteurs de production d'hydrogène ou des composants d'électrolyseurs, les éléments MoSi_2 permettent le frittage ou le traitement thermique des supports de catalyseur haute température afin de garantir une activité et une stabilité élevées du catalyseur. Lors de l'installation, les éléments sont fixés par des supports en alumine haute pureté et des pinces à faible résistance sont utilisées pour les connexions électriques. L'alimentation à commande proportionnelle permet un contrôle précis de la température afin de répondre aux exigences des matériaux SOFC en matière de courbes de température strictes. L'opération nécessite le contrôle de l'atmosphère du four afin d'éviter que l'environnement hautement réducteur n'endommage la membrane SiO_2 et de franchir rapidement la plage de températures critique pour prévenir les dommages dus à l'oxydation. La maintenance comprend l'inspection régulière de la membrane SiO_2 , du raccordement à l'extrémité froide et de la propreté du four afin de garantir l'absence de contamination par des impuretés susceptibles d'altérer les performances du matériau. Les composants MoSi_2 améliorent les performances électrochimiques des matériaux des piles à combustible et le rendement des équipements de production d'hydrogène en optimisant les champs thermiques et les paramètres de procédé. Largement utilisés dans la production d'énergie propre, la production industrielle d'hydrogène et la conversion d'énergie, ils constituent un soutien important au développement commercial de la technologie de l'hydrogène.

8.7 Application des éléments chauffants MoSi_2 à la protection de l'environnement et à la catalyse

En disiliciure de molybdène (MoSi_2) sont largement utilisés dans le traitement des gaz résiduels, la régénération des catalyseurs et la valorisation des déchets solides, notamment en protection de l'environnement et en catalyse, grâce à leurs excellentes performances à haute température, leur résistance à l'oxydation et leur stabilité électrothermique. Grâce au film protecteur de SiO_2 formé à leur surface en atmosphère oxydante, les éléments MoSi_2 offrent une excellente résistance à l'oxydation et conviennent à un fonctionnement prolongé à haute température. Leur résistivité à coefficient de température positif assure un contrôle précis de la température et une répartition uniforme du champ thermique, répondant ainsi aux exigences de protection de l'environnement et des procédés catalytiques en matière de haute température, de propreté de l'environnement et de résistance à la corrosion. Les éléments MoSi_2 en forme de U, de W, en spirale et à tige droite sont personnalisables en fonction des besoins de l'équipement. Les modèles en U et en spirale conviennent aux petits réacteurs de haute précision, tandis que les modèles en W et à tige droite conviennent aux grands équipements de traitement continu. Des supports en alumine haute pureté sont utilisés pour l'installation afin de respecter les caractéristiques de dilatation thermique du MoSi_2 et de réduire les contraintes mécaniques et thermiques. Des pinces à faible résistance sont utilisées pour les connexions électriques, et un fonctionnement stable est assuré par des alimentations à commande proportionnelle. Le fonctionnement doit franchir rapidement la plage de températures critique afin d'éviter la formation d'oxydes non protecteurs. Le revêtement de surface (tel que SiC ou Al_2O_3) améliore la résistance aux chocs thermiques et à la corrosion, et prolonge la durée de vie des composants. Un entretien régulier comprend la vérification de l'intégrité du film de SiO_2 , de l'état des connexions de l'extrémité froide et de la propreté du four afin de garantir l'absence de contamination par des impuretés et de respecter les normes élevées en matière de protection de l'environnement et de catalyse. Les éléments MoSi_2 contribuent de manière essentielle à l'efficacité et à la fiabilité du traitement des gaz d'échappement, de la régénération des catalyseurs et de l'utilisation des déchets solides en optimisant la conception du champ thermique et les paramètres de fonctionnement.

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

8.7.1 Traitement des gaz résiduaires

En MoSi_2 sont utilisés dans les incinérateurs haute température, les fours d'oxydation catalytique et les fours de pyrolyse dans le processus de traitement des gaz résiduaires. Ils permettent de traiter les gaz résiduaires industriels, les composés organiques volatils (COV) et les gaz nocifs (tels que les NO_x et les SO_x). Le traitement des gaz résiduaires nécessite une température élevée pour décomposer les composants nocifs ou favoriser les réactions catalytiques. La densité de puissance élevée et la capacité de contrôle précis de la température des éléments en MoSi_2 garantissent que le réacteur atteint la température requise et maintient un champ thermique uniforme, favorisant ainsi une décomposition et une conversion efficaces des gaz résiduaires. Les éléments en MoSi_2 de type W et à tige droite conviennent aux grands fours de traitement des gaz résiduaires, couvrant une large zone de chauffage et permettant un traitement continu des gaz résiduaires. Les éléments de type U et en spirale conviennent aux petits fours ou aux fours de laboratoire, pour des expériences de haute précision ou des traitements à petite échelle. Le film protecteur de SiO_2 reste stable en atmosphère oxydante, et le revêtement de surface améliore la résistance aux chocs thermiques et à la corrosion, s'adaptant aux gaz corrosifs (tels que les chlorures ou les sulfures) éventuellement présents dans les gaz résiduaires. Lors de l'installation, l'élément est fixé par un support en alumine haute pureté, et la connexion électrique utilise une pince à faible résistance, associée à une alimentation à commande proportionnelle pour un contrôle précis de la température. L'opération nécessite de contrôler l'atmosphère du four afin d'éviter que l'environnement hautement réducteur n'endommage le film de SiO_2 , et de franchir rapidement la plage de températures « malsaine » pour prévenir les dommages par oxydation. La maintenance comprend l'inspection régulière de l'état de surface des composants et de la propreté du four, ainsi que l'élimination des impuretés susceptibles d'affecter l'efficacité du traitement. Les composants en MoSi_2 améliorent l'efficacité de la décomposition et le taux de conformité des émissions lors du traitement des gaz résiduaires, et sont largement utilisés dans les industries chimiques, énergétiques et de protection de l'environnement.

8.7.2 Régénération du catalyseur

MoSi_2 sont utilisés dans les fours de régénération à haute température et les fours de traitement thermique dans le processus de régénération des catalyseurs pour restaurer l'activité des catalyseurs, tels que les catalyseurs de craquage catalytique dans les produits pétrochimiques, les catalyseurs de réduction catalytique sélective (SCR) dans le domaine de la protection de l'environnement et les catalyseurs industriels (tels que les catalyseurs à base de métaux précieux).

Après une utilisation prolongée, le catalyseur se désactive en raison du dépôt de matières carbonées, de sulfures ou d'autres substances toxiques à sa surface. Le processus de régénération doit brûler ces dépôts à haute température tout en protégeant la microstructure et les sites actifs du catalyseur afin de restaurer ses performances catalytiques. La densité de puissance élevée et la précision de contrôle de la température des éléments MoSi_2 permettent de créer un environnement stable à haute température pour garantir l'efficacité du processus de régénération et le rétablissement des performances du catalyseur.

MoSi_2 en forme de U et en spirale conviennent aux petits fours de régénération, aux procédés de régénération en laboratoire ou à petite échelle. Ils assurent un chauffage centralisé pour un contrôle précis

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

de la température et répondent aux exigences de courbes de température strictes de catalyseurs spécifiques. Les éléments MoSi_2 en forme de W et en tige droite conviennent aux grands fours de régénération industriels. Ils peuvent couvrir une large zone de chauffage, fournir un champ thermique uniforme pour le traitement par lots des catalyseurs et garantir la régularité des effets de régénération. Le film protecteur de SiO_2 reste stable en atmosphère oxydante, et le revêtement de surface (tel que SiC ou Al_2O_3) améliore la résistance aux chocs thermiques et à la corrosion, et s'adapte aux gaz corrosifs (tels que les atmosphères soufrées ou chlorées) ou aux cycles thermiques fréquents pouvant survenir pendant le processus de régénération.

Lors de l'installation, l'élément est fixé par un support en alumine haute pureté, suspendu verticalement ou horizontalement afin de réduire les contraintes mécaniques. La connexion électrique utilise une pince à faible résistance et une alimentation à commande proportionnelle assure un contrôle précis de la température. L'opération nécessite un contrôle strict de l'atmosphère du four afin d'éviter que l'environnement de forte réduction ne détruise le film de SiO_2 et de franchir rapidement la plage de température critique pour prévenir la formation d'oxydes non protecteurs. La maintenance comprend l'inspection régulière de l'état de surface de l'élément, de la connexion de l'extrémité froide et de la propreté du four, ainsi que l'élimination des impuretés (telles que les oxydes métalliques) susceptibles d'affecter la pureté du catalyseur. Les éléments MoSi_2 optimisent le champ thermique et les paramètres du procédé pour garantir une efficacité élevée et un effet de récupération d'activité lors de la régénération du catalyseur, et prolonger sa durée de vie. Ils sont largement utilisés dans les domaines de la pétrochimie, de la protection de l'environnement et de la catalyse industrielle.

8.7.3 Utilisation des ressources en déchets solides

MoSi_2 sont utilisés dans les fours de pyrolyse, les incinérateurs et les fours de frittage haute température utilisés dans les procédés de recyclage des déchets solides. Ils permettent de traiter les déchets industriels, les déchets urbains, les déchets dangereux et de récupérer des matériaux valorisables (tels que les métaux, la céramique ou le verre). Le recyclage des déchets solides nécessite des températures élevées pour décomposer la matière organique, volatiliser les substances nocives ou fritter les composants des déchets solides afin de former des matériaux réutilisables. La stabilité des performances à haute température et la distribution uniforme du champ thermique des éléments en MoSi_2 permettent de répondre à ces exigences. Les éléments en MoSi_2 de type W et à tige droite conviennent aux grands fours de pyrolyse ou d'incinération. Ils couvrent une large zone de chauffe, permettent un traitement continu des déchets solides et garantissent l'efficacité et la régularité du processus de pyrolyse ou de frittage. Les éléments en MoSi_2 de type U et à spirale conviennent aux petits fours expérimentaux ou au traitement de déchets solides spécifiques, aux procédés de haute précision ou à des fins de R&D, et assurent un chauffage centralisé pour optimiser les conditions de réaction. Le film protecteur SiO_2 offre une protection anti-oxydation fiable en atmosphère oxydante. Le revêtement de surface améliore la résistance aux chocs thermiques et à la corrosion, s'adaptant ainsi à l'atmosphère complexe susceptible d'être présente lors du traitement des déchets solides (chlore, soufre ou métaux lourds volatils). Lors de l'installation, les composants sont fixés par des supports en alumine haute pureté et des pinces à faible résistance sont utilisées pour les connexions électriques. L'alimentation à commande proportionnelle permet un contrôle précis de la température afin de répondre aux exigences de gestion des ressources en déchets solides pour

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

des courbes de température spécifiques. L'opération nécessite le contrôle de l'atmosphère du four afin d'éviter que l'environnement hautement réducteur n'endommage le film SiO_2 et de franchir rapidement la plage de températures critique pour prévenir les dommages dus à l'oxydation. La maintenance comprend l'inspection régulière du film SiO_2 , des connexions froides et de la propreté du four, ainsi que l'élimination des impuretés susceptibles d'affecter la qualité des produits à base de ressources. Les composants MoSi_2 favorisent la décomposition efficace, la récupération des matériaux et l'utilisation des ressources des déchets solides en fournissant un environnement fiable à haute température, et sont largement utilisés dans les industries de la protection de l'environnement, de l'économie circulaire et du recyclage des ressources.

8.8 Application des éléments chauffants MoSi_2 dans d'autres domaines

En disiliciure de molybdène (MoSi_2) ont démontré une valeur d'application unique dans des domaines de haute technologie tels que l'aérospatiale et le nucléaire, grâce à leurs excellentes performances à haute température, leur résistance à l'oxydation et leur stabilité électrothermique. Grâce au film protecteur de SiO_2 formé à leur surface en atmosphère oxydante, les éléments MoSi_2 offrent une excellente résistance à l'oxydation, ce qui les rend adaptés à un fonctionnement à haute température de longue durée. Leur résistivité à coefficient de température positif assure un contrôle précis de la température et une répartition uniforme du champ thermique, répondant ainsi aux exigences de conditions de travail complexes en matière de températures élevées, d'environnement propre et de résistance aux cycles thermiques. Les éléments MoSi_2 en forme de U, de W, en spirale et à tige droite sont personnalisables en fonction des besoins de l'équipement. Les types en U et en spirale conviennent aux petits fours de haute précision, tandis que les types en W et à tige droite conviennent aux essais de grande envergure ou aux équipements auxiliaires.

Des supports en alumine haute pureté sont utilisés pour l'installation afin de respecter les caractéristiques de dilatation thermique du MoSi_2 et de réduire les contraintes mécaniques et thermiques. Des pinces à faible résistance assurent les connexions électriques, et un fonctionnement stable est assuré par une alimentation à commande proportionnelle. Le fonctionnement doit franchir rapidement la plage de températures critique afin d'éviter la formation d'oxydes non protecteurs. Le revêtement de surface (tel que SiC ou Al_2O_3) améliore la résistance aux chocs thermiques et à la corrosion, prolongeant ainsi la durée de vie du composant. Une maintenance régulière comprend la vérification de l'intégrité du film de SiO_2 , de l'état des connexions de l'extrémité froide et de la propreté du four afin de garantir l'absence de contamination par des impuretés et de répondre aux exigences strictes des industries aérospatiale et nucléaire. Les éléments en MoSi_2 offrent un support fiable pour les essais de matériaux et l'exploitation des équipements de haute technologie en optimisant la conception du champ thermique et les paramètres de fonctionnement.

8.8.1 Essais de matériaux aérospatiaux

En MoSi_2 sont utilisés dans les fours d'essai à haute température, les fours d'essai à cycle thermique et les équipements de simulation environnementale pour tester les performances de matériaux clés tels que les alliages haute température, les composites à matrice céramique et les composites en fibre de carbone.

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

Les matériaux aérospatiaux doivent subir des tests de performance mécanique, thermique et chimique dans des conditions de températures extrêmement élevées afin de vérifier leur fiabilité dans les moteurs, les aubes de turbine ou les systèmes de protection thermique des engins spatiaux.

La densité de puissance élevée et la précision de contrôle de la température des éléments MoSi₂ permettent de simuler ces environnements difficiles. Les éléments MoSi₂ en U et en spirale conviennent aux petits fours d'essai, fournissant un chauffage centralisé pour des tests de haute précision, adaptés à l'exposition thermique ou aux expériences de cycles thermiques sur des échantillons de petite taille. Les éléments en W et en tige droite conviennent aux grands fours d'essai, couvrant une large zone de chauffage et offrant un champ thermique uniforme pour tester de grandes pièces structurales. Le film protecteur de SiO₂ reste stable en atmosphère oxydante, et le revêtement de surface améliore la résistance aux chocs thermiques et à la corrosion, s'adaptant aux atmosphères oxydantes ou corrosives à l'état de traces pouvant être impliquées dans les essais.

Lors de l'installation, l'élément est fixé par un support en alumine haute pureté, et la connexion électrique utilise une pince à faible résistance, associée à une alimentation à commande proportionnelle pour un contrôle précis de la courbe de température. L'opération nécessite un contrôle strict de l'atmosphère du four afin d'éviter que l'environnement de réduction n'endommage le film de SiO₂, et un passage rapide dans la plage de températures critique pour prévenir les dommages par oxydation. La maintenance comprend des inspections régulières de l'état de surface du composant, de la connexion de l'extrémité froide et de la propreté du four afin de garantir qu'aucune impureté n'affecte les résultats des tests. Les composants MoSi₂ permettent des tests de haute précision des matériaux aérospatiaux en offrant un environnement haute température stable et des performances de cycle thermique fiables, fournissant des données clés pour le développement et la certification des matériaux.

8.8.2 Équipements auxiliaires de l'industrie nucléaire

En MoSi₂ sont utilisés dans les fours de frittage haute température, les fours de traitement thermique et les réacteurs expérimentaux des équipements auxiliaires de l'industrie nucléaire pour la préparation d'éléments combustibles nucléaires, de matériaux de réacteurs, ainsi que pour les essais et le traitement des céramiques ou alliages haute température associés. L'industrie nucléaire impose des exigences très strictes en matière de contrôle de la température, de propreté et de stabilité à long terme des équipements. La stabilité des performances à haute température et la répartition uniforme du champ thermique des éléments en MoSi₂ permettent de répondre à ces exigences. Les éléments en MoSi₂ en U et en spirale conviennent aux petits fours expérimentaux, au frittage et au traitement thermique de particules de combustible nucléaire ou de petits matériaux de réacteurs, et offrent un contrôle de température de haute précision pour garantir les performances des matériaux. Les éléments en W et en tige droite conviennent aux grands équipements auxiliaires, tels que les fours de frittage de crayons de combustible nucléaire ou les fours de traitement thermique de composants de réacteurs, assurant un chauffage uniforme sur une grande surface pour soutenir la production de masse.

Le film protecteur et le revêtement de surface SiO₂ garantissent un fonctionnement durable des composants en atmosphère oxydante ou légèrement corrosive, et leur résistance aux chocs thermiques s'adapte à des cycles thermiques fréquents. Des supports en alumine haute pureté sont utilisés pour

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

l'installation, et une puissance de contrôle proportionnelle est utilisée pour les connexions électriques afin d'obtenir un contrôle précis de la température et de répondre aux exigences strictes de l'industrie nucléaire en matière de paramètres de procédé. L'opération nécessite le contrôle de l'atmosphère du four afin d'éviter que l'environnement hautement réducteur n'endommage le film SiO_2 et de franchir rapidement la plage de températures de « peste » pour prévenir les dommages par oxydation. La maintenance comprend des inspections régulières du film SiO_2 , des connexions à froid et de la propreté du four afin de garantir l'absence de contamination par des impuretés pouvant affecter la qualité des matériaux nucléaires. Les éléments MoSi_2 contribuent à la préparation et à la vérification des performances des matériaux clés de l'industrie nucléaire en fournissant un environnement haute température fiable, offrant ainsi des garanties importantes pour la sûreté et l'efficacité de la technologie nucléaire.

8.8.3 Chimie de synthèse à haute température

MoSi_2 sont utilisés dans les réacteurs et les fours expérimentaux en chimie de synthèse à haute température pour la synthèse de céramiques haute température, de composés intermétalliques, de matériaux fonctionnels et de produits chimiques haute performance. Cette technique exige que les réactions soient réalisées dans des conditions de température strictement contrôlées afin de garantir la pureté, la structure cristalline et les propriétés chimiques des produits.

La densité de puissance élevée et la précision du contrôle de température des éléments MoSi_2 garantissent un environnement réactionnel stable. Les éléments MoSi_2 en U et en spirale conviennent aux petits fours expérimentaux, à la synthèse chimique en laboratoire ou à la recherche et développement de nouveaux matériaux, offrant un chauffage centralisé pour un contrôle de température de haute précision. Les éléments en W et à tige droite conviennent aux grands réacteurs, permettant la production industrielle de produits chimiques ou de matériaux, garantissant l'uniformité du champ thermique et réduisant les réactions irrégulières.

Le film protecteur de SiO_2 reste stable en atmosphère oxydante, et le revêtement de surface (tel que SiC ou Al_2O_3) améliore la résistance aux chocs thermiques et à la corrosion, et s'adapte aux gaz corrosifs ou aux produits volatils susceptibles d'être présents pendant le processus de synthèse. Lors de l'installation, les composants sont fixés par des supports en alumine haute pureté, des pinces à faible résistance sont utilisées pour les connexions électriques, et une alimentation à commande proportionnelle permet un contrôle précis de la courbe de température. L'opération nécessite de contrôler l'atmosphère du four afin d'éviter que l'environnement hautement réducteur ne détruise le film de SiO_2 , et de franchir rapidement la plage de températures de « peste » pour prévenir les dommages par oxydation.

La maintenance comprend des inspections régulières de l'état de surface du composant, des connexions froides et de la propreté du four afin de garantir l'absence de contamination par des impuretés pouvant affecter la qualité du produit synthétisé. Les composants MoSi_2 contribuent à l'efficacité des réactions et à la qualité des produits en chimie de synthèse à haute température en fournissant un environnement haute température fiable. Ils sont largement utilisés dans les industries des matériaux de pointe et de la chimie.

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

8.8.4 Transformateur MoSi₂ tiges

En MoSi₂ sont utilisés comme sources de chauffage haute température dans les applications liées aux transformateurs, pour les tests de matériaux, le traitement thermique des matériaux isolants et les procédés haute température en cours de fabrication. La fabrication de transformateurs implique le traitement haute température de tôles d'acier au silicium, de céramiques isolantes ou d'autres matériaux résistants aux hautes températures. La stabilité des performances à haute température et la distribution uniforme du champ thermique des éléments en MoSi₂ permettent de répondre à ces exigences. Les éléments en MoSi₂ en U et en spirale conviennent aux petits fours de traitement thermique, au chauffage local des composants de transformateurs ou aux tests en laboratoire, et offrent un contrôle de température de haute précision pour optimiser les propriétés des matériaux. Les éléments en W et en tige droite conviennent aux grands fours industriels pour le recuit de tôles d'acier au silicium ou le frittage de matériaux isolants, favorisant ainsi la production en série et garantissant l'uniformité du champ thermique. Le film protecteur en SiO₂ offre une protection antioxydante fiable en atmosphère oxydante, et le revêtement de surface améliore la résistance aux chocs thermiques et à la corrosion, s'adaptant à l'atmosphère corrosive présente lors de la fabrication des transformateurs. L'installation adopte un support en alumine de haute pureté et la connexion électrique utilise une alimentation à commande proportionnelle pour un contrôle précis de la température et la stabilité des paramètres du procédé. L'opération doit franchir rapidement la plage de températures critiques afin d'éviter les dommages dus à l'oxydation. La maintenance comprend l'inspection régulière du film de SiO₂, de la connexion de l'extrémité froide et de la propreté du four afin de garantir qu'aucune impureté n'affecte la qualité du matériau. Les composants MoSi₂ offrent un environnement haute température fiable, facilitent le traitement thermique et l'optimisation des performances des matériaux clés dans la fabrication des transformateurs, améliorent l'efficacité et la fiabilité des transformateurs et sont largement utilisés dans la fabrication d'équipements électriques.



CTIA GROUP LTD Tige de silicium-molybdène

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

CTIA GROUP LTD
MoSi₂ Heating Element Introduction

1. Overview of MoSi₂ Heating Element

Molybdenum disilicide (MoSi₂) heating elements are high-performance ceramic electric heating materials widely used in industrial furnace applications. In high-temperature oxidizing atmospheres, MoSi₂ forms a dense silica (SiO₂) protective layer on its surface, which effectively prevents further oxidation. It exhibits excellent oxidation resistance and thermal stability, allowing stable operation under high temperatures for extended periods.

2. Features of MoSi₂ Heating Element

Low thermal expansion coefficient: Well-matched with common ceramic substrates, minimizing the risk of cracking caused by thermal stress.

Excellent oxidation resistance: Forms a dense SiO₂ protective film on the surface, effectively preventing material degradation from oxidation.

Extremely high working temperature: Capable of continuous operation up to 1700°C, and a maximum usage temperature of 1800°C in oxidizing atmospheres.

Good high-temperature electrical resistance characteristics: MoSi₂ exhibits relatively stable resistivity at high temperatures, with only a gradual increase in resistivity at elevated temperatures.

3. Specifications of MoSi₂ Heating Element

Model (d1/d2)	Hot End Diameter (d1)	Cold End Diameter (d2)	Hot Zone Length (Le)	Cold Zone Length (Lu)	Common Types
φ3/6	3 mm	6 mm	100–300 mm	150–250 mm	Straight / U-type
φ4/9	4 mm	9 mm	100–500 mm	200–300 mm	Straight / U-type
φ6/12	6 mm	12 mm	100–600 mm	200–350 mm	Straight / U-type / W-type
φ9/18	9 mm	18 mm	150–800 mm	250–400 mm	Straight / U-type / W-type
φ12/24	12 mm	24 mm	200–1000 mm	300–500 mm	Straight / U-type / W-type

4. Typical Applications of MoSi₂ Heating Element

High-temperature sintering furnaces in the ceramics and powder metallurgy industries

Heat treatment equipment for steel and non-ferrous metals

High-temperature laboratory furnaces

Diffusion, annealing, and oxidation processes in the semiconductor and photovoltaic industries

5. Purchasing Information

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

Website: www.molybdenum.com.cn

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 Comparaison des éléments chauffants en MoSi₂ avec d'autres matériaux chauffants

En disiliciure de molybdène (MoSi₂) sont largement utilisés pour le chauffage à haute température en raison de leurs excellentes performances à haute température, de leur résistance à l'oxydation et de leur stabilité électrothermique. Comparés à d'autres matériaux chauffants courants tels que le tungstène et le carbure de silicium (SiC), les éléments en MoSi₂ présentent des avantages uniques en termes de résistance à l'oxydation, de plage de températures de fonctionnement et d'adaptabilité aux procédés, mais ils présentent également certaines limites. Ce chapitre compare les performances du MoSi₂ à celles des éléments chauffants en tungstène et en carbure de silicium, analyse leurs différences en termes de coût, d'efficacité et d'adaptabilité aux applications, et fournit des conseils pour le choix de matériaux chauffants adaptés à différentes conditions de travail. Les éléments en MoSi₂ doivent être installés avec des supports en alumine de haute pureté pour s'adapter aux caractéristiques de dilatation thermique, et des pinces à faible résistance doivent être utilisées pour les connexions électriques, avec une alimentation à commande proportionnelle pour garantir la stabilité. Le fonctionnement doit franchir rapidement la plage de températures critique pour éviter la formation d'oxydes non protecteurs. Les revêtements de surface (tels que SiC ou Al₂O₃) peuvent améliorer la résistance aux chocs thermiques et à la corrosion. Un entretien régulier comprend la vérification de l'intégrité du film de SiO₂ et de l'état de la connexion de l'extrémité froide afin de garantir l'absence de contamination par des impuretés.

9.1 Comparaison avec les éléments chauffants en tungstène

En MoSi₂ et en tungstène présentent chacun leurs avantages pour les applications à haute température, mais leurs applications et leurs performances diffèrent considérablement. Les éléments en MoSi₂ offrent une excellente résistance à l'oxydation grâce au film protecteur de SiO₂ formé à leur surface en atmosphère oxydante, ce qui les rend adaptés à un fonctionnement à long terme. Leur température maximale de fonctionnement peut atteindre 1850 °C et ils sont largement utilisés dans les procédés en environnements oxydants tels que le frittage de céramique, la fusion du verre et la fabrication de semi-conducteurs. La résistivité à coefficient de température positif du MoSi₂ lui permet d'ajuster la puissance de manière adaptative et d'assurer un contrôle de température stable, ce qui est idéal pour les applications nécessitant un contrôle de température de haute précision. Il présente un coefficient de dilatation thermique modéré, une bonne résistance aux chocs thermiques, peut supporter des cycles thermiques fréquents et convient aux structures en U, en W ou en spirale. Le procédé de fabrication des éléments en MoSi₂ (tel que la métallurgie des poudres et le pressage isostatique) permet une personnalisation flexible des formes pour répondre aux exigences complexes des fours. Cependant, le MoSi₂ est susceptible de générer des oxydes non protecteurs dans la plage de température de « peste » de 400 à 700 °C, et une augmentation et une diminution rapides de la température sont nécessaires pour éviter la dégradation du matériau, et la température de fonctionnement doit être abaissée dans un environnement réducteur ou sous vide pour protéger le film SiO₂ .

En revanche, les éléments chauffants en tungstène sont connus pour leur point de fusion extrêmement élevé et leur excellente résistance mécanique, ce qui les rend adaptés aux applications à très haute température (comme le traitement thermique des métaux sous vide ou sous atmosphère inerte). Très sensibles à l'oxydation en atmosphère oxydante, ils doivent être utilisés sous vide ou sous protection

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

gazeuse, ce qui limite leur utilisation en environnement oxydant. Le tungstène présente une faible résistivité et varie moins avec la température, ce qui le rend adapté aux scénarios nécessitant une puissance de sortie élevée. Cependant, sa précision de contrôle de température est inférieure à celle du MoSi_2 , ce qui nécessite un système de contrôle de puissance plus complexe. Les éléments en tungstène présentent un faible coefficient de dilatation thermique et une faible résistance aux chocs thermiques. Des cycles thermiques fréquents peuvent entraîner une rupture fragile, limitant ainsi leur application sous des charges thermiques dynamiques. Les éléments en tungstène présentent des coûts de fabrication et de traitement élevés, et leur forme est difficile à personnaliser. Il s'agit principalement de structures en fil ou en tige, ce qui limite la flexibilité de conception des fours complexes. De plus, le tungstène présente une densité élevée, ce qui entraîne un poids d'élément plus lourd et une conception de structure d'installation et de support plus complexe.

La comparaison entre le MoSi_2 et le tungstène montre que le MoSi_2 offre une meilleure résistance à l'oxydation et une meilleure précision de contrôle de la température en atmosphère oxydante, et convient aux industries telles que la céramique, le verre et les semi-conducteurs. Le tungstène, quant à lui, est plus adapté aux applications à très haute température (comme la fusion d'alliages à haute température) sous vide ou sous atmosphère inerte. Le choix doit être basé sur l'environnement du procédé, les exigences de température et la fréquence des cycles thermiques. La stabilité à long terme et la flexibilité du MoSi_2 en environnement oxydant le rendent plus avantageux dans la plupart des fours à haute température.

9.2 Comparaison avec les composants en carbure de silicium

En MoSi_2 et en carbure de silicium (SiC) sont couramment utilisés dans le domaine du chauffage à haute température, mais leurs performances et leurs applications diffèrent considérablement. Les éléments MoSi_2 présentent une excellente résistance à l'oxydation en atmosphère oxydante grâce à leur couche protectrice de SiO_2 en surface. Leur température de fonctionnement maximale peut atteindre 1850°C , ce qui est idéal pour les procédés haute température de haute précision tels que le frittage de céramique, la fusion du verre et la croissance épitaxiale de semi-conducteurs. Leur résistivité à coefficient de température positif permet une régulation adaptative de la puissance, un contrôle précis de la température et convient aux applications nécessitant un champ thermique stable. Le MoSi_2 présente un coefficient de dilatation thermique modéré, une bonne résistance aux chocs thermiques et peut supporter des cycles thermiques fréquents. Les structures en U, en W et en spirale conviennent à divers types de fours. Le procédé de fabrication des éléments MoSi_2 est flexible et permet de réaliser des formes complexes par métallurgie des poudres et pressage isostatique pour répondre à des besoins spécifiques. Cependant, le MoSi_2 est sujet à une oxydation non protectrice dans la plage de température de la « peste », nécessitant une augmentation et une diminution rapides de la température, et la température de fonctionnement doit être abaissée dans un environnement réducteur ou sous vide pour protéger le film SiO_2 .

En SiC sont réputés pour leur dureté élevée, leur résistance à l'usure et leur stabilité chimique. Ils sont largement utilisés dans les fours industriels et les procédés à moyenne et haute température. Ils peuvent également former un film protecteur de SiO_2 en atmosphère oxydante et présentent une bonne résistance à l'oxydation. Cependant, leur température maximale de fonctionnement est généralement inférieure à

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

celle du MoSi_2 et conviennent aux procédés à 1 300-1 600 °C. La résistivité du SiC varie de manière plus complexe avec la température, avec un coefficient de température négatif (la résistance diminue à haute température), ce qui peut entraîner une instabilité de la puissance de sortie. Un système de contrôle précis est donc nécessaire pour maintenir l'uniformité de la température. Les éléments en SiC ont un coefficient de dilatation thermique plus faible et sont légèrement moins résistants aux chocs thermiques que le MoSi_2 . Des cycles thermiques fréquents peuvent provoquer des microfissures, en particulier sur les éléments de grande taille. Le procédé de fabrication des éléments SiC (comme le frittage par réaction ou la recristallisation) limite la complexité de la forme, généralement en forme de tige ou de tube, et la flexibilité de personnalisation est inférieure à celle du MoSi_2 . De plus, les éléments SiC peuvent subir une corrosion locale dans des atmosphères corrosives contenant du soufre ou des halogènes, ce qui nécessite des mesures de protection de surface supplémentaires.

Comparaison entre le MoSi_2 et le SiC : le MoSi_2 présente des avantages dans les plages de températures plus élevées et les scénarios de contrôle précis de la température, et convient aux industries de haute technologie comme la fabrication de semi-conducteurs et de céramiques spéciales. Le SiC, quant à lui, est plus adapté aux applications industrielles à moyenne et haute température et sensibles aux coûts, comme le traitement thermique des métaux et le frittage céramique conventionnel. La température du procédé, les conditions atmosphériques et les exigences du cycle thermique doivent être prises en compte lors du choix.

9.3 Analyse du coût, de l'efficacité et de l'adéquation de l'application des éléments chauffants

Les différences de coût, d'efficacité et d'applicabilité des éléments chauffants en MoSi_2 , tungstène et SiC influencent directement leur choix dans différentes industries. Le coût de fabrication des éléments en MoSi_2 est modéré, et les procédés de métallurgie des poudres et de pressage isostatique sont matures, permettant la production de formes complexes (en U, en W, en spirale, etc.) pour répondre aux besoins de divers types de fours. Le MoSi_2 présente un rendement opérationnel élevé et sa résistivité à coefficient de température positif permet une régulation adaptative de la puissance, réduit le gaspillage d'énergie et convient aux scénarios nécessitant un contrôle précis de la température et un fonctionnement à long terme, tels que le frittage de céramique, le traitement du verre et la fabrication de semi-conducteurs. Le MoSi_2 présente une excellente résistance à l'oxydation en atmosphère oxydante et de faibles coûts de maintenance, mais il doit franchir rapidement la plage de températures critique pour éviter les dommages dus à l'oxydation, et les revêtements de surface peuvent prolonger sa durée de vie. Les éléments MoSi_2 ont une large gamme d'adaptabilité d'application et conviennent aux processus à haute température dans une atmosphère oxydante, mais la température doit être abaissée dans un environnement réducteur ou sous vide, ce qui limite son utilisation dans certains traitements des métaux à ultra-haute température.

Le coût de fabrication des éléments chauffants en tungstène est relativement élevé en raison de la difficulté de mise en œuvre due à son point de fusion élevé. La plupart d'entre eux se présentent sous forme de fils ou de tiges, ce qui rend coûteuse la personnalisation de formes complexes. Le tungstène offre une meilleure efficacité opérationnelle sous vide ou sous atmosphère inerte, ce qui le rend adapté aux applications à très haute température (comme la fusion d'alliages à haute température). Cependant, il s'oxyde très facilement en atmosphère oxydante, ce qui nécessite un système de contrôle d'atmosphère

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

supplémentaire, augmentant ainsi les coûts d'exploitation et de maintenance. Les éléments en tungstène présentent une faible résistance aux chocs thermiques et des cycles thermiques fréquents peuvent provoquer des fractures. Leur maintenance est coûteuse. Il convient aux applications exigeant des températures et un environnement sous vide extrêmement élevés, comme les essais de matériaux aérospatiaux, mais son champ d'application est restreint en raison des restrictions atmosphériques.

En SiC présentent des coûts de fabrication relativement faibles et un procédé de frittage par réaction relativement simple, ce qui les rend adaptés à la production à grande échelle d'éléments en tige ou tubulaires. Le rendement opérationnel du SiC est élevé à moyennes et hautes températures, mais sa résistivité à coefficient de température négatif peut entraîner une instabilité de puissance, nécessitant un système de contrôle complexe pour maintenir l'homogénéité de la température et augmentant les coûts d'exploitation. Les éléments en SiC présentent une bonne résistance à l'oxydation en atmosphère oxydante, mais peuvent subir une dégradation locale en atmosphère corrosive, et leurs coûts de maintenance sont modérés.

Chapitre 10 Normes et spécifications pertinentes pour les éléments chauffants en MoSi₂

En disiliciure de molybdène (MoSi₂) doivent respecter des normes et spécifications strictes afin de garantir la qualité du produit, la stabilité des performances et la sécurité des procédés. À l'échelle mondiale, les normes nationales chinoises, internationales et les normes pertinentes d'Europe, d'Amérique, du Japon et de Corée du Sud fournissent des orientations techniques pour la fabrication et l'utilisation des éléments chauffants en MoSi₂ . Ces normes couvrent la composition chimique, les propriétés physiques, le procédé de fabrication, les méthodes d'essai et les spécifications d'application du matériau. Ce chapitre présente en détail les normes nationales chinoises, internationales et les normes pertinentes d'Europe, d'Amérique, du Japon et de Corée du Sud relatives aux éléments chauffants en MoSi₂ , afin de servir de référence aux fabricants, aux ingénieurs et aux utilisateurs. La normalisation des éléments en MoSi₂ contribue à uniformiser la qualité des produits, à améliorer l'interchangeabilité et à promouvoir le commerce mondial et la coopération technique.

10.1 Norme nationale chinoise pour les éléments chauffants en MoSi₂

La norme nationale chinoise (GB/T) a formulé un certain nombre de spécifications pour la production, les tests de performance et l'application des éléments chauffants en MoSi₂ , principalement gérées par le Comité technique national de normalisation des métaux non ferreux (TC243) et d'autres institutions. Ces normes garantissent la stabilité des performances et la sécurité des éléments chauffants en MoSi₂ dans des environnements oxydants à haute température et conviennent à des secteurs tels que le frittage de céramique, la fusion du verre et la fabrication de semi-conducteurs. Les normes concernées comprennent l'analyse chimique des matériaux, les tests de propriétés physiques et les exigences techniques relatives aux équipements de chauffage électrique industriels. Par exemple, la norme de composition chimique des éléments en MoSi₂ spécifie les exigences de teneur et le contrôle des impuretés des éléments majeurs tels que le molybdène et le silicium afin de garantir la résistance à l'oxydation et la stabilité électrothermique. Les normes de performance physique impliquent des méthodes d'essai pour la résistivité, le coefficient de dilatation thermique, la résistance aux chocs thermiques et la résistance mécanique afin de garantir la fiabilité des éléments à haute température et lors de cycles thermiques

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

fréquents. De plus, les normes relatives aux équipements de chauffage électrique industriel imposent des exigences pour l'installation, l'exploitation et la maintenance des éléments MoSi_2 , telles que l'utilisation de supports en alumine de haute pureté pour correspondre aux caractéristiques de dilatation thermique, le franchissement rapide de la plage de températures de « peste » pour éviter la formation d'oxydes non protecteurs, et la vérification régulière de l'intégrité du film protecteur de SiO_2 . Ces normes sont publiées par l'Administration d'État pour la régulation du marché et l'Administration nationale de normalisation. Certaines d'entre elles se réfèrent ou adoptent des normes internationales non équivalentes (telles que les spécifications ISO) afin de s'adapter aux besoins industriels de la Chine et de suivre l'évolution des normes internationales.

10.2 Normes internationales pour les éléments chauffants en MoSi_2

L'Organisation internationale de normalisation (ISO) et la Commission électrotechnique internationale (CEI) ont élaboré des normes internationales relatives aux éléments chauffants en MoSi_2 , principalement axées sur les matériaux haute température, les équipements de chauffage électrique industriel et les méthodes d'essai de performance. Ces normes fournissent un cadre technique unifié pour la production et l'application mondiales des éléments en MoSi_2 , couvrant les propriétés des matériaux, les procédés de fabrication et les spécifications d'essai. Par exemple, les normes ISO peuvent inclure des méthodes d'essai de performance pour les céramiques haute température ou les composés intermétalliques, notamment des tests de résistance à l'oxydation, de conductivité thermique et de résistivité, afin de garantir la stabilité à long terme des éléments en MoSi_2 en atmosphère oxydante. Les normes CEI se concentrent sur les exigences techniques des équipements de chauffage électrique industriel, spécifiant le raccordement électrique, la précision du contrôle de température et les exigences de sécurité des éléments en MoSi_2 , telles que l'utilisation de pinces à faible résistance et la configuration des alimentations à commande proportionnelle. Les normes internationales incluent également des méthodes d'essai pour la résistance aux chocs thermiques et à la corrosion des composants dans des environnements à haute température, guidant les fabricants dans l'optimisation des revêtements de surface (tels que le SiC ou l' Al_2O_3) afin de prolonger la durée de vie. De plus, les normes ISO et CEI mettent l'accent sur les spécifications de fonctionnement des composants dans des atmosphères spécifiques (telles que les environnements oxydants ou à traces d'oxygène), exigeant un passage rapide à basse température pour éviter l'oxydation par fléau. Ces normes favorisent l'interchangeabilité et la coopération technique des composants MoSi_2 sur le marché mondial et sont largement utilisées dans les domaines de la céramique, des semi-conducteurs et de la préparation de nouveaux matériaux énergétiques.

10.3 Normes relatives aux éléments chauffants MoSi_2 en Europe, en Amérique, au Japon, en Corée et dans d'autres pays

En Europe, aux États-Unis, au Japon, en Corée du Sud et ailleurs, les normes relatives aux éléments chauffants en MoSi_2 sont élaborées par les organismes de normalisation de chaque pays, combinant les besoins industriels locaux et les normes internationales, et couvrant les propriétés des matériaux, les procédés de fabrication et les spécifications d'application. En Europe, le Comité européen de normalisation (CEN) et d'autres institutions (telles que l'Institut allemand de normalisation DIN et l'Institut britannique de normalisation BSI) ont élaboré des normes relatives aux éléments chauffants

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

électriques haute température, portant sur la composition chimique, la résistivité, le coefficient de dilatation thermique et les méthodes d'essai de résistance à l'oxydation des éléments en MoSi_2 .

Ces normes mettent l'accent sur la stabilité à long terme des composants en atmosphère oxydante, précisent les conditions de formation et les exigences de résistance à la corrosion du film protecteur de surface en SiO_2 et s'appliquent à des secteurs tels que le frittage de céramique et le traitement du verre. La norme DIN peut affiner les spécifications d'installation des éléments en MoSi_2 , telles que l'utilisation de supports en alumine de haute pureté et la conception à faible résistance des connexions électriques. Les normes formulées par l'American National Standards Institute (ANSI) se concentrent sur les performances et la sécurité des équipements de chauffage électrique industriels, impliquant la précision du contrôle de la température et les tests de performance des cycles thermiques des éléments en MoSi_2 afin de garantir leur fiabilité dans les tests de matériaux pour semi-conducteurs et aérospatiaux.

Le Japon et la Corée du Sud ont élaboré des spécifications pertinentes pour les composants MoSi_2 par l'intermédiaire des normes industrielles japonaises (JIS) et de l'Agence coréenne pour la technologie et les normes (KATS). Ces spécifications se concentrent sur les applications dans la fabrication de céramiques et de semi-conducteurs à haute température, et précisent les conditions de fonctionnement des composants en atmosphères oxydantes et légèrement corrosives, telles que des montées et descentes rapides en température pour éviter l'oxydation dite « peste ». Ces normes se réfèrent généralement aux cadres ISO et CEI, mais sont adaptées aux spécificités industrielles locales (telles que les besoins de fabrication de précision du Japon), en mettant l'accent sur un contrôle de température de haute précision et une conception à longue durée de vie des composants. Les normes européennes, américaines, japonaises et coréennes favorisent l'application et le commerce des composants MoSi_2 sur le marché mondial grâce à des méthodes d'essai et des exigences de qualité unifiées.



CTIA GROUP LTD Tige de silicium-molybdène

[COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT](#)

Annexe : Glossaire des termes relatifs aux éléments chauffants en MoSi₂

Termes professionnels courants et leurs définitions dans le domaine des éléments chauffants en disiliciure de molybdène (MoSi₂). Ces termes visent à fournir des références techniques claires aux fabricants, ingénieurs et utilisateurs. Ils couvrent des aspects tels que les propriétés des matériaux, les procédés de fabrication, les tests de performance et les scénarios d'application, facilitant ainsi la compréhension des caractéristiques et des spécifications d'utilisation des éléments chauffants en MoSi₂ .

le terme	définition
Disiliciure de molybdène (MoSi₂)	Composé intermétallique composé de molybdène et de silicium qui présente un point de fusion élevé, une résistance élevée à l'oxydation et d'excellentes propriétés électrothermiques et est souvent utilisé dans les éléments chauffants à haute température.
Film protecteur SiO₂	de MoSi ₂ dans une atmosphère oxydante pour empêcher une oxydation supplémentaire du matériau et améliorer la stabilité à haute température.
Oxydation de la peste	Le MoSi ₂ forme des oxydes non protecteurs (tels qu'un mélange de MoO ₃ et de SiO ₂) dans la plage de température de 400 à 700 ° C, ce qui provoque la pulvérisation et la détérioration du matériau.
Résistivité à coefficient de température positif (CTP)	du MoSi ₂ augmentant avec la température prend en charge la régulation adaptative de la puissance et convient aux applications de contrôle précis de la température.
Extrémité chaude	L' élément chauffant en MoSi ₂ est généralement plus fin et génère la chaleur principale. Les spécifications courantes incluent Φ6 mm ou Φ9 mm.
Jonction froide	L' élément chauffant MoSi ₂ est généralement plus épais (tel que Φ12 mm ou Φ18 mm) et dopé avec des matériaux conducteurs pour réduire la résistivité.
élément en U	Une structure d' éléments chauffants MoSi ₂ , en forme de U, adaptée aux petits fours ou au chauffage central, facile à installer et à remplacer.
composants de type W	MoSi ₂ , en forme de W, adapté aux grands fours, offrant un champ thermique uniforme et une bonne résistance aux chocs thermiques.
élément en spirale	L' élément chauffant MoSi ₂ convient aux fours tubulaires ou au chauffage de haute précision, avec champ de chaleur concentré et contrôle précis de la température.
Élément de tige droite	en MoSi ₂ conviennent au chauffage uniforme de grandes surfaces et sont souvent utilisés dans les fours industriels continus.
Coefficient de dilatation thermique	MoSi ₂ dont la température est d'environ $8,1 \times 10^{-6} \text{K}^{-1}$, ce qui affecte la conception correspondante des composants et des supports.
Résistance aux chocs thermiques	MoSi ₂ à résister aux changements rapides de température sans se fissurer est liée à leur ténacité à la rupture et à leurs propriétés de dilatation thermique.

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

Ténacité à la rupture	MoSi ₂ à résister à la propagation des fissures est généralement faible et le processus doit être optimisé pour réduire le risque de microfissures.
Conductivité thermique	MoSi ₂ qui conduit la chaleur affecte l'uniformité du champ thermique et l'efficacité du chauffage.
Densité de puissance	La puissance de chauffage par unité de surface reflète la capacité de chauffage de l'élément MoSi ₂ et doit être adaptée en fonction du type de four et du processus.
Pressage à chaud (HP)	Un procédé de fabrication de composants MoSi ₂ qui utilise le moulage à haute température et sous pression pour améliorer la densité et les propriétés mécaniques.
Frittage sans pression	Un procédé de fabrication de composants MoSi ₂ à moindre coût avec une densité légèrement inférieure, adapté aux applications moins exigeantes.
Synthèse autopropagée à haute température (SHS)	Le MoSi ₂ obtenu en allumant une poudre mixte Mo-Si pour induire une réaction exothermique est peu coûteux mais présente une faible uniformité.
Pressage isostatique	MoSi ₂ utilisant une pression uniforme conviennent à la production de composants aux formes complexes.
Revêtement de surface	Une couche protectrice (telle que SiC , Al ₂ O ₃) appliquée sur la surface du MoSi ₂ est utilisée pour améliorer la résistance aux chocs thermiques et à la corrosion.
Projection plasma	Technique d'application de revêtements de surface par projection plasma à haute température pour former un revêtement dense adapté aux applications industrielles.
Dépôt chimique en phase vapeur (CVD)	les composants MoSi ₂ de haute précision .
Test de résistivité	pour mesurer la résistivité des composants MoSi ₂ , on utilise généralement la méthode des quatre sondes pour évaluer les performances électrothermiques.
Test antioxydant	pour évaluer la stabilité des composants MoSi ₂ dans des atmosphères oxydantes à haute température, en mesurant l'épaisseur du film SiO ₂ et la perte de masse.
Test de performance aux chocs thermiques	L'expérience simule une augmentation et une diminution rapides de la température pour tester la résistance aux fissures des composants MoSi ₂ et évalue les changements dans les microfissures et la résistance mécanique.
Essai de dureté Vickers	de MoSi ₂ à l'aide d'un testeur de dureté Vickers reflète la résistance à l'usure et les propriétés mécaniques.
Atmosphère oxydante	Environnement de fonctionnement contenant de l'oxygène (pression partielle d'oxygène ≥ 0,2 atm), principale condition d'application des composants MoSi ₂ .

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

Atmosphère réductrice	Dans un environnement contenant des gaz réducteurs tels que l'hydrogène ou le monoxyde de carbone, la température de fonctionnement du MoSi ₂ doit être abaissée pour éviter la défaillance du film SiO ₂ .
Alimentation à commande proportionnelle	Un système d'alimentation qui régule avec précision la puissance des composants MoSi ₂ , permettant un contrôle stable de la température grâce à ses caractéristiques de coefficient de température positif.
Pince à faible résistance	pour connecter la jonction froide MoSi ₂ à l'alimentation électrique, avec une faible résistance de contact et garantissant la stabilité électrique.
Support en alumine de haute pureté	utilisé pour supporter les composants MoSi ₂ , en faisant correspondre le coefficient de dilatation thermique pour réduire les contraintes thermiques.
Uniformité du champ thermique	L'uniformité de la distribution de la température dans le four est affectée par la disposition et la conductivité thermique des composants MoSi ₂ et nécessite une conception optimisée.
Modification du dopage	d'ajouter une petite quantité d'éléments (tels que Y ₂ O ₃ , Al ₂ O ₃) à MoSi ₂ pour améliorer la résistance aux joints de grains ou la résistance à l'oxydation.
Métallurgie des poudres	MoSi ₂ par pressage et frittage de poudre, adaptés à la réalisation de formes complexes.
Taux de perte de qualité	MoSi ₂ soumis à une oxydation à haute température reflètent les performances anti-oxydation.
Taille des grains	La taille des grains cristallins dans la microstructure MoSi ₂ affecte la résistance mécanique et la résistance aux chocs thermiques.

Illustrer :

Ce glossaire s'appuie sur les pratiques de fabrication, de test et d'application des éléments chauffants en MoSi₂ et se réfère à la littérature et aux données techniques pertinentes. Les définitions des termes sont concises et précises, et s'appliquent aux domaines de la céramique, du verre, des semi-conducteurs, des nouvelles énergies et de la protection de l'environnement. Les utilisateurs peuvent compléter ou adapter la terminologie en fonction des exigences spécifiques du procédé.



CTIA GROUP LTD Tige de silicium-molybdène

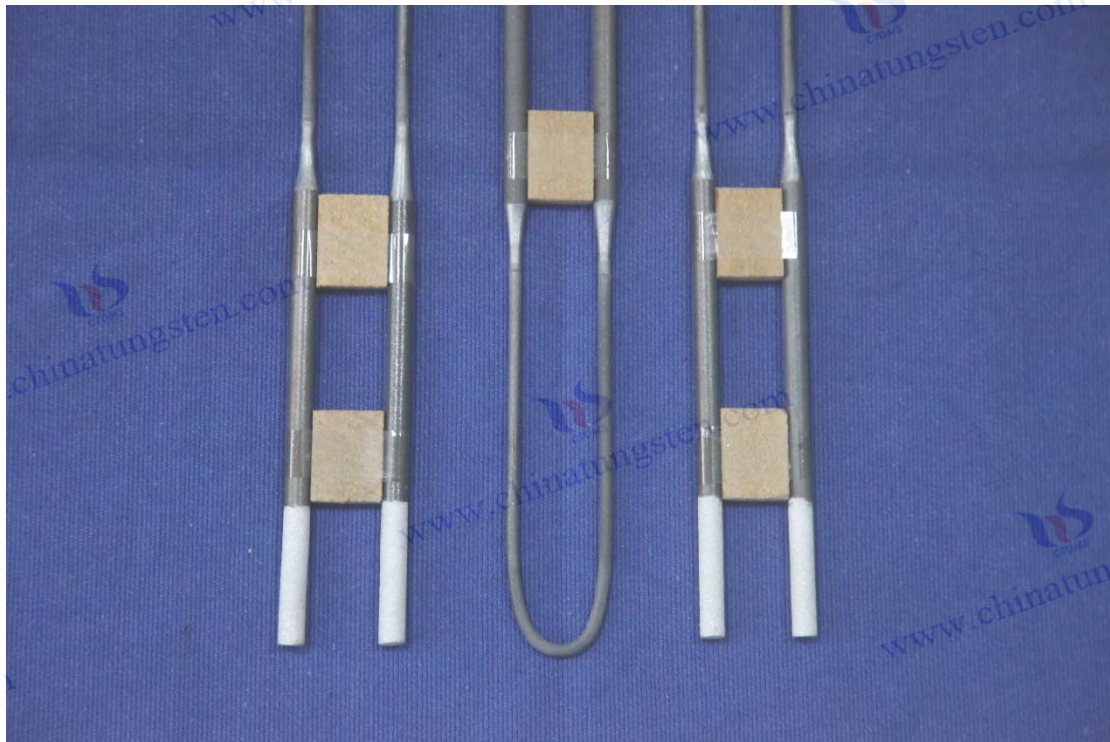
COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

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

Littérature anglaise

- [1] Progrès dans les matériaux à base de MoSi_2 pour applications à haute température. Science et ingénierie des matériaux : A, 2010.
- [2] Propriétés électriques et thermiques des éléments chauffants en MoSi_2 . Ceramics International, 2005.
- [3] Disiliciure de molybdène. Éléments américains.
- [4] Éléments chauffants en disiliciure de molybdène. Stanford Advanced Materials.
- [5] Guide d'utilisation des éléments chauffants en disiliciure de molybdène.
- [6] Matériaux à base de MoSi_2 et leurs propriétés. Journal of Materials Science, 1999.
- [7] Éléments chauffants MoSi_2 . Kanthal®.
- [8] Comportement à l'oxydation des matériaux à base de MoSi_2 . Journal of the American Ceramic Society, 2001.
- [9] Revêtements de surface pour éléments chauffants en MoSi_2 . Technologie des surfaces et des revêtements, 2008.
- [10] Comportement aux chocs thermiques et à la fatigue des éléments chauffants à base de MoSi_2 . Journal of Materials Research, 2003.



CTIA GROUP LTD Tige de silicium-molybdène

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