

Qué es el elemento calefactor MoSi_2

中钨智造科技有限公司

CTIA GROUP LTD

CTIA GROUP LTD

Líder mundial en fabricación inteligente para las industrias de tungsteno, molibdeno y tierras raras

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

INTRODUCCIÓN A CTIA GROUP

CTIA GROUP LTD, una subsidiaria de propiedad absoluta con personalidad jurídica independiente establecida por CHINATUNGSTEN ONLINE, se dedica a promover el diseño y la fabricación inteligentes, integrados y flexibles de materiales de tungsteno y molibdeno en la era de Internet industrial. CHINATUNGSTEN ONLINE, fundada en 1997 con www.chinatungsten.com como punto de partida (el primer sitio web de productos de tungsteno de primer nivel de China), es la empresa de comercio electrónico pionera del país centrada en las industrias del tungsteno, el molibdeno y las tierras raras. Aprovechando casi tres décadas de profunda experiencia en los campos del tungsteno y el molibdeno, CTIA GROUP hereda las excepcionales capacidades de diseño y fabricación, los servicios superiores y la reputación comercial global de su empresa matriz, convirtiéndose en un proveedor integral de soluciones de aplicación en los campos de productos químicos de tungsteno, metales de tungsteno, carburos cementados, aleaciones de alta densidad, molibdeno y aleaciones de molibdeno.

En los últimos 30 años, CHINATUNGSTEN ONLINE ha creado más de 200 sitios web profesionales multilingües sobre tungsteno y molibdeno, disponibles en más de 20 idiomas, con más de un millón de páginas de noticias, precios y análisis de mercado relacionados con el tungsteno, el molibdeno y las tierras raras. Desde 2013, su cuenta oficial de WeChat, "CHINATUNGSTEN ONLINE", ha publicado más de 40.000 artículos, atendiendo a casi 100.000 seguidores y proporcionando información gratuita a diario a cientos de miles de profesionales del sector en todo el mundo. Con miles de millones de visitas acumuladas a su sitio web y cuenta oficial, se ha convertido en un centro de información global y de referencia para las industrias del tungsteno, el molibdeno y las tierras raras, ofreciendo noticias multilingües, rendimiento de productos, precios de mercado y servicios de tendencias del mercado 24/7.

Basándose en la tecnología y la experiencia de CHINATUNGSTEN ONLINE, CTIA GROUP se centra en satisfacer las necesidades personalizadas de los clientes. Utilizando tecnología de IA, diseña y produce en colaboración con los clientes productos de tungsteno y molibdeno con composiciones químicas y propiedades físicas específicas (como tamaño de partícula, densidad, dureza, resistencia, dimensiones y tolerancias). Ofrece servicios integrales de proceso completo que abarcan desde la apertura del molde y la producción de prueba hasta el acabado, el embalaje y la logística. Durante los últimos 30 años, CHINATUNGSTEN ONLINE ha proporcionado servicios de I+D, diseño y producción para más de 500.000 tipos de productos de tungsteno y molibdeno a más de 130.000 clientes en todo el mundo, sentando las bases para una fabricación personalizada, flexible e inteligente. Con esta base, CTIA GROUP profundiza aún más en la fabricación inteligente y la innovación integrada de materiales de tungsteno y molibdeno en la era del Internet Industrial.

El Dr. Hanns y su equipo en CTIA GROUP, con más de 30 años de experiencia en la industria, han escrito y publicado análisis de conocimiento, tecnología, precios del tungsteno y tendencias del mercado relacionados con el tungsteno, el molibdeno y las tierras raras, compartiéndolos libremente con la industria del tungsteno. El Dr. Han, con más de 30 años de experiencia desde la década de 1990 en el comercio electrónico y el comercio internacional de productos de tungsteno y molibdeno, así como en el diseño y la fabricación de carburos cementados y aleaciones de alta densidad, es un reconocido experto en productos de tungsteno y molibdeno tanto a nivel nacional como internacional. Fiel al principio de proporcionar información profesional y de alta calidad a la industria, el equipo de CTIA GROUP escribe continuamente documentos de investigación técnica, artículos e informes de la industria basados en las prácticas de producción y las necesidades de los clientes del mercado, obteniendo amplios elogios en la industria. Estos logros brindan un sólido respaldo a la innovación tecnológica, la promoción de productos y los intercambios industriales de CTIA GROUP, impulsándolo a convertirse en un líder en la fabricación de productos de tungsteno y molibdeno y en servicios de información a nivel mundial.



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

Tabla de contenido

Capítulo 1 Introducción

- 1.1 Descripción general de los elementos calefactores de MoSi₂
- 1.2 Historia del desarrollo de los elementos calefactores de MoSi₂
- 1.3 Estado de aplicación de los elementos calefactores de MoSi₂
- 1.4 Industrias de aplicación de los elementos calefactores de MoSi₂

Capítulo 2 Características de los elementos calefactores de MoSi₂ y sus factores influyentes

- 2.1 Propiedades físicas de los elementos calefactores de MoSi₂
- 2.2 Resistividad de los elementos calefactores de MoSi₂
- 2.3 Características de resistencia a altas temperaturas de los elementos calefactores de MoSi₂
- 2.4 Resistencia a la oxidación a altas temperaturas de los elementos calefactores de MoSi₂
- 2.5 Conductividad térmica y difusividad térmica de los elementos calefactores de MoSi₂
- 2.6 Estabilidad al choque térmico de los elementos calefactores de MoSi₂
- 2.7 Estabilidad al choque térmico de los elementos calefactores de MoSi₂
- 2.8 Comportamiento ante la fatiga térmica de los elementos calefactores de MoSi₂
- 2.9 Estado de la superficie del elemento calefactor de MoSi₂
 - 2.9.1 Tipos de recubrimientos protectores comúnmente utilizados
 - 2.9.2 Estudio de grietas superficiales y adherencia del recubrimiento
 - 2.9.3 Formación y protección de la película de óxido de SiO₂ superficial
- 2.10 Problemas de superficie de los elementos calefactores de MoSi₂ y sus soluciones
- 2.11 Factores que afectan las propiedades termodinámicas de los elementos calefactores de MoSi₂
 - 2.11.1 Efecto de la temperatura de funcionamiento
 - 2.11.2 Influencia de la atmósfera
 - 2.11.3 Efecto de la frecuencia de calentamiento/enfriamiento
 - 2.11.4 Influencia de la tensión de funcionamiento
 - 2.11.5 Efecto de la densidad de corriente
 - 2.11.6 Impacto del método de instalación
 - 2.11.7 Impacto de la calidad y pureza de los componentes
 - 2.11.8 Efecto del tratamiento de protección del recubrimiento
- 2.12 CTIA GROUP LTD Ficha de datos de seguridad del elemento calefactor MoSi₂

Capítulo 3 Estructura y diseño de elementos calefactores de MoSi₂

- 3.1 Estructuras comunes de elementos calefactores de MoSi₂
 - 3.1.1 Elemento calefactor de MoSi₂ en forma de U
 - 3.1.2 Elemento calefactor MoSi₂ tipo W
 - 3.1.3 Elemento calefactor espiral de MoSi₂
 - 3.1.4 Elemento calefactor de MoSi₂ tipo varilla recta
 - 3.1.5 Comparación de diseños estructurales en forma de U, en forma de W y rectos
- 3.2 Diseño de tamaño del elemento calefactor MoSi₂ (los comunes son Φ 6/12 y Φ 9/18)

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

- 3.3 Diseño óptimo del campo térmico y la estructura del extremo frío
- 3.4 Diseño de sistemas de conexión y soporte eléctricos
- 3.5 Estructura del terminal y método de conexión
- 3.6 Puntos clave del diseño de personalización de productos

Capítulo 4 Proceso de fabricación del elemento calefactor de MoSi₂

- 4.1 Principios de selección y dosificación de materias primas
- 4.2 Metalurgia de polvos y proceso de prensado isostático
- 4.3 Tecnología de sinterización y posprocesamiento a alta temperatura
- 4.4 Tecnología de capa de protección de superficie
- 4.5 Tecnología de soldadura y procesamiento de extremos

Capítulo 5 Prueba de rendimiento del elemento calefactor MoSi₂

- 5.1 Prueba de relación entre resistividad y temperatura
- 5.2 Prueba de la relación entre la vida útil a alta temperatura y el rendimiento de choque térmico
- 5.3 Prueba de estabilidad en ambiente oxidativo
- 5.4 Prueba de dureza del elemento calefactor
- 5.5 Prueba sobre la relación entre la resistencia a la oxidación y la temperatura
- 5.6 Relación entre la rugosidad de la superficie de la varilla y la resistividad
- 5.7 Efecto de la uniformidad del recubrimiento de la varilla en la vida útil
- 5.8 Relación entre la vida útil y el acoplamiento de tensiones
- 5.9 Mecanismos de agrietamiento, flexión y ablación terminal
- 5.10 Análisis de microestructura y estudio del modo de falla

Capítulo 6 Instalación de elementos calefactores de MoSi₂

- 6.1 Preparaciones previas a la instalación
- 6.2 Pasos de instalación detallados
- 6.3 Notas de instalación
- 6.4 Especificaciones de operación de seguridad
- 6.5 Fallas comunes y guía de mantenimiento
 - 6.5.1 Causas y soluciones de rotura del elemento calefactor
 - 6.5.2 Causas del desprendimiento de la capa de óxido y tratamiento de regeneración
 - 6.5.3 Métodos de mantenimiento diario de los elementos calefactores
 - 6.5.4 Tecnología de sustitución y reciclaje de elementos calefactores
- 6.6 Métodos típicos de instalación en hornos industriales

Capítulo 7 Normas de prueba y certificación de elementos calefactores de MoSi₂

- 7.1 Método de prueba del rendimiento del elemento calefactor
- 7.2 Análisis de normas ISO, ASTM y otras
- 7.3 Prueba de adaptabilidad ambiental
- 7.4 Modos de falla y métodos de predicción de vida útil
- 7.5 Requisitos del código de seguridad y eléctrico

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

Capítulo 8 Aplicación de elementos calefactores de MoSi₂

- 8.1 Aplicación de elementos calefactores de MoSi₂ en la industria metalúrgica
 - 8.1.1 Fundición de metales y tratamiento térmico
 - 8.1.2 Proceso de sinterización a alta temperatura
 - 8.1.3 Equipos de tratamiento térmico
- 8.2 Aplicación de elementos calefactores MoSi₂ en la industria cerámica
 - 8.2.1 Cocción y esmaltado de cerámica
 - 8.2.2 Preparación de materiales cerámicos especiales
- 8.3 Aplicación de elementos calefactores MoSi₂ en la industria fotovoltaica
 - 8.3.1 Proceso de alta temperatura para la fabricación de obleas de silicio
 - 8.3.2 Equipos de producción de células solares
- 8.4 Aplicación de elementos calefactores de MoSi₂ en la industria de semiconductores
 - 8.4.1 Proceso de recocido y difusión de obleas
 - 8.4.2 Crecimiento epitaxial de semiconductores
 - 8.4.3 Equipo de grabado a alta temperatura
 - 8.4.4 Equipos de recubrimiento al vacío
- 8.5 Aplicación de elementos calefactores de MoSi₂ en la industria de fabricación de vidrio
 - 8.5.1 Fusión de vidrio
 - 8.5.2 Procesamiento del vidrio
- 8.6 Aplicación de elementos calefactores de MoSi₂ en la preparación de nuevos materiales energéticos
 - 8.6.1 Sinterización de materiales de baterías de litio
 - 8.6.2 Energía del hidrógeno y pilas de combustible
- 8.7 Aplicación de elementos calefactores de MoSi₂ en la protección ambiental y la catálisis
 - 8.7.1 Tratamiento de gases residuales
 - 8.7.2 Regeneración del catalizador
 - 8.7.3 Aprovechamiento de recursos de residuos sólidos
- 8.8 Aplicación de elementos calefactores de MoSi₂ en otros campos
 - 8.8.1 Pruebas de materiales aeroespaciales
 - 8.8.2 Equipos auxiliares de la industria nuclear
 - 8.8.3 Química sintética de alta temperatura
 - 8.8.4 Transformador de varilla de MoSi₂

Capítulo 9 Comparación de elementos calefactores de MoSi₂ con otros materiales calefactores

- 9.1 Comparación con elementos calefactores de tungsteno
- 9.2 Comparación con componentes de carburo de silicio
- 9.3 Análisis del coste, la eficiencia y la idoneidad de la aplicación de los elementos calefactores

Capítulo 10 Normas y especificaciones relevantes para elementos calefactores de MoSi₂

- 10.1 Norma nacional china para elementos calefactores de MoSi₂
- 10.2 Normas internacionales para elementos calefactores de MoSi₂
- 10.3 Estándares de elementos calefactores MoSi₂ en Europa, América, Japón, Corea y otros países

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

apéndice:

Glosario

Referencias



CTIA GROUP LTD Varilla de silicio y molibdeno

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

Capítulo 1 Introducción

1.1 los elementos calefactores MoSi₂

El disiliciuro de molibdeno (MoSi₂) es un compuesto intermetálico con la fórmula química MoSi₂ . Presenta un alto punto de fusión (aproximadamente 2030 °C), excelente resistencia a la oxidación a alta temperatura y buena conductividad eléctrica y térmica. Se utiliza ampliamente en el campo del calentamiento a alta temperatura gracias a sus características tanto metálicas como cerámicas. Como material de calentamiento resistivo, los elementos calefactores de disiliciuro de molibdeno se utilizan principalmente en equipos de calentamiento eléctrico en atmósferas oxidantes de alta temperatura. A alta temperatura, se genera una densa película protectora de dióxido de silicio (SiO₂) sobre su superficie, lo que previene eficazmente la oxidación interna y prolonga su vida útil. Los elementos calefactores de MoSi₂ funcionan de forma estable en el rango de temperatura de 500 a 1850 °C y son adecuados para campos de investigación industrial y científica como la sinterización de cerámica, la fusión de vidrio, el tratamiento térmico de metales, la sinterización a alta temperatura y los hornos de alta temperatura de laboratorio. En comparación con otros materiales calefactores como el carburo de silicio (SiC), el disiliciuro de molibdeno ofrece una temperatura de funcionamiento más alta y una mejor resistencia a la oxidación a alta temperatura. Sin embargo, su fragilidad a baja temperatura y su rendimiento de fluencia a alta temperatura también limitan algunas aplicaciones estructurales. Actualmente, los elementos calefactores de MoSi₂ presentan diversas formas, como la forma de U, la forma de W, la forma de L y formas personalizadas, que satisfacen ampliamente las necesidades de diversos hornos industriales.

1.2 Historia del desarrollo de los elementos calefactores MoSi₂

El estudio del disiliciuro de molibdeno como material de alta temperatura comenzó a principios del siglo XX, pero su aplicación como elemento calefactor comenzó a mediados de ese mismo siglo. En 1904, científicos describieron por primera vez la estructura cristalina del MoSi₂ y confirmaron que se trataba de un cristal tetragonal de tipo α con un alto punto de fusión y las características de un compuesto intermetálico. Sin embargo, debido a las limitaciones de la tecnología de preparación y la pureza del material en aquel momento, el MoSi₂ se utilizó principalmente como material de investigación de laboratorio, más que como material industrial. En la década de 1930, con la investigación exhaustiva sobre aleaciones y materiales cerámicos de alta temperatura, el MoSi₂ comenzó a destacar por su excelente resistencia a la oxidación y conductividad a alta temperatura. Los investigadores descubrieron que la película protectora de SiO₂ formada sobre la superficie del MoSi₂ en una atmósfera oxidante de alta temperatura puede mejorar significativamente su durabilidad, lo que sentó las bases teóricas para el posterior desarrollo de elementos calefactores.

En 1947, Kanthal de Suecia tomó la iniciativa en la producción de la primera varilla de calentamiento de disiliciuro de molibdeno industrializada , marcando la entrada oficial de los elementos de calentamiento MoSi₂ en la etapa de aplicación comercial. Estas primeras varillas de calentamiento se utilizaron principalmente en hornos industriales de alta temperatura, con una temperatura máxima de funcionamiento de unos 1600 °C. Kanthal mejoró significativamente la resistencia mecánica y la

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

resistencia a la oxidación de los componentes optimizando el proceso de sinterización y la tecnología de dopaje de MoSi_2 . En las décadas de 1950 y 1960, con la aparición de tecnologías de preparación avanzadas como la sinterización al vacío y la pulverización de plasma, la eficiencia de producción y el rendimiento de los elementos de calentamiento MoSi_2 se mejoraron aún más. La forma del elemento ha evolucionado de una sola varilla recta a un tipo U y un tipo L para satisfacer las necesidades de los diferentes tipos de hornos. Además, los investigadores han mejorado la fragilidad del MoSi_2 a bajas temperaturas y las propiedades de fluencia a altas temperaturas dopando elementos de tierras raras u otros metales (como W y Nb), ampliando aún más su rango de aplicación. En la década de 1980, China comenzó a producir industrialmente elementos calefactores de disiliciuro de molibdeno. Inicialmente, dependía principalmente de tecnología importada, pero gradualmente desarrolló capacidades independientes de investigación y desarrollo. Durante este período, la temperatura máxima de funcionamiento de los elementos calefactores de MoSi_2 se incrementó a $1800\text{ }^\circ\text{C}$, y se utilizan ampliamente en industrias como la cerámica, el vidrio y los materiales refractarios. En ese mismo período, la empresa sueca Kanthal lanzó el elemento calefactor Kanthal Super 1900, con una temperatura máxima de funcionamiento de $1850\text{ }^\circ\text{C}$, convirtiéndose en un referente en la industria. El éxito de este producto se debe al uso de materias primas de alta pureza y a la mejora de la tecnología de soldadura de extremo frío y extremo caliente, que mejora significativamente la estabilidad del elemento en ciclos de alta y baja temperatura.

Desde la década de 1990, la investigación y el desarrollo de elementos calefactores de MoSi_2 se han centrado en la optimización del rendimiento y la expansión de sus aplicaciones. Nuevos procesos de preparación, como la sinterización por prensado en caliente, la sinterización por reacción y la síntesis autopropagante a alta temperatura (SHS), han mejorado significativamente la densidad y las propiedades mecánicas del material. Simultáneamente, el desarrollo de la tecnología de recubrimiento de MoSi_2 ha permitido su uso como recubrimiento protector de alta temperatura en el sector aeroespacial, por ejemplo, para álabes de turbinas de gas y componentes de motores a reacción. Además, el desarrollo de polvos de MoSi_2 a escala nanométrica ha permitido la preparación de materiales compuestos de alto rendimiento, solucionando parcialmente el problema de su fragilidad a baja temperatura. En términos del mercado global, el valor de mercado del elemento calefactor MoSi_2 fue de aproximadamente US\$103 millones en 2016 y se espera que alcance los US\$135 millones en 2022, con una tasa de crecimiento anual compuesta del 4,7%, lo que refleja su continua demanda en el campo industrial de alta temperatura. Si bien los elementos calefactores de MoSi_2 ofrecen un buen rendimiento en campos de alta temperatura, su desarrollo aún enfrenta desafíos. La fragilidad a baja temperatura y las insuficientes propiedades de fluencia a alta temperatura limitan su aplicación como materiales estructurales, mientras que los altos costos de producción también afectan su competitividad en el mercado de gama baja. En el futuro, las líneas de investigación podrían centrarse en el desarrollo de materiales compuestos, la modificación con dopaje y nuevos procesos de preparación para mejorar aún más el rendimiento y reducir costos.

1.3 Estado de aplicación de los elementos calefactores de disiliciuro de molibdeno

de disiliciuro de molibdeno (MoSi_2) desempeñan un papel importante en la industria global de alta temperatura debido a su excelente resistencia a la oxidación a alta temperatura, temperatura de

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

funcionamiento de hasta 1850 °C y propiedades eléctricas estables. Este elemento se utiliza ampliamente en hornos eléctricos de alta temperatura en la producción industrial, la investigación científica y el procesamiento de materiales especiales. Su principal ventaja es que puede operar de forma estable durante un largo periodo en una atmósfera oxidante, y la densa película protectora de dióxido de silicio (SiO_2) generada en la superficie previene eficazmente la oxidación interna, prolongando así significativamente su vida útil. En los últimos años, los avances en la ciencia de los materiales y los procesos de fabricación han promovido la mejora del rendimiento de los elementos calefactores de MoSi_2 . Por ejemplo, mediante la modificación por dopaje y la tecnología avanzada de sinterización, se han mejorado las propiedades de fragilidad a baja temperatura y fluencia a alta temperatura del elemento, lo que le permite adaptarse a entornos de trabajo más exigentes.

En el mercado global, la demanda de elementos calefactores de MoSi_2 continúa creciendo, especialmente en las industrias de cerámica, vidrio y semiconductores. La empresa sueca Kanthal domina el mercado con su serie de productos Kanthal Super (como Kanthal Super 1900), que son conocidos por su excelente rendimiento y confiabilidad a altas temperaturas. Empresas en China, Japón y Estados Unidos también están desarrollando y produciendo activamente elementos calefactores de MoSi_2 , entre los cuales China tiene ventajas significativas en control de costos y producción a gran escala. En términos de proceso de fabricación, tecnologías como la sinterización por prensado en caliente , la sinterización por reacción y la síntesis autopropagante de alta temperatura (SHS) han mejorado la densidad y las propiedades mecánicas del material, y la forma del elemento también ha evolucionado de una sola varilla recta a formas en forma de U, W, L y personalizadas para satisfacer las necesidades de diferentes diseños de hornos. Además, el desarrollo de polvos de MoSi_2 a escala nanométrica ha abierto nuevas áreas de aplicación para materiales compuestos y recubrimientos de alto rendimiento, como recubrimientos protectores de alta temperatura en las industrias aeroespacial y energética.

Aunque los elementos calefactores MoSi_2 tienen un buen rendimiento en campos de alta temperatura, aún enfrentan algunos desafíos. La fragilidad a baja temperatura limita su potencial en ciertas aplicaciones estructurales, mientras que los altos costos de producción hacen que se enfrente a la competencia de materiales alternativos como el carburo de silicio (SiC) en el mercado de gama baja. Los enfoques de investigación actuales incluyen la mejora de las propiedades mecánicas mediante el dopaje de elementos de tierras raras o metales (como W, Nb) y el desarrollo de nuevos materiales compuestos para mejorar la resistencia al choque térmico y la durabilidad. Con el auge de los hornos inteligentes de alta temperatura, los requisitos para el control preciso de la temperatura y una larga vida útil de los elementos calefactores MoSi_2 se han mejorado aún más, lo que ha promovido el desarrollo de tecnologías de control relacionadas y la optimización de materiales. En el futuro, a medida que aumenta la demanda mundial de métodos de producción eficientes, ahorradores de energía y respetuosos con el medio ambiente, se espera que los elementos calefactores MoSi_2 se utilicen en más campos emergentes.

1.4 Industrias de aplicación de los elementos calefactores de MoSi_2

de disiliciuro de molibdeno se utilizan ampliamente en diversas industrias gracias a su alta estabilidad térmica, resistencia a la oxidación y excelentes propiedades eléctricas. Las principales áreas de aplicación

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

son las siguientes: En la industria cerámica, los elementos calefactores de MoSi_2 son componentes clave en los procesos de sinterización y procesamiento a alta temperatura para la producción de cerámica estructural, cerámica funcional y materiales refractarios. Su temperatura máxima de funcionamiento de $1850\text{ }^\circ\text{C}$ permite satisfacer los requisitos de sinterización de cerámicas de alto rendimiento como la alúmina, la zirconia y el nitruro de silicio, garantizando la calidad del producto y la estabilidad del proceso. En la industria del vidrio, los elementos calefactores de MoSi_2 se utilizan ampliamente en hornos de alta temperatura y hornos de recocido para la producción de vidrio óptico, vidrio plano y vidrio especial. Su resistencia a la oxidación y su larga vida útil le permiten funcionar de forma continua en una atmósfera oxidante de alta temperatura, lo que mejora significativamente la eficiencia de la producción.

En el campo del tratamiento térmico de metales, los elementos calefactores de MoSi_2 se utilizan en procesos de recocido, temple y soldadura fuerte a alta temperatura, especialmente para el tratamiento de acero inoxidable, aleaciones de titanio y aleaciones de alta temperatura. Su rápido calentamiento y su preciso control de temperatura mejoran la calidad del producto y la eficiencia del proceso. En la industria de semiconductores, los hornos de difusión de alta temperatura y los hornos de oxidación suelen utilizar elementos calefactores de MoSi_2 para el tratamiento térmico de obleas de silicio y los procesos de deposición de películas delgadas. Su alta pureza y estabilidad cumplen con los estrictos requisitos de la industria de semiconductores en cuanto a un entorno limpio y un control preciso de la temperatura.

En el sector aeroespacial, el MoSi_2 no solo se utiliza como elemento calefactor, sino también como recubrimiento protector en álabes de turbinas de gas y componentes de motores a reacción. Su resistencia a la oxidación y a la corrosión a altas temperaturas le confiere un excelente rendimiento en entornos extremos. En el campo de la investigación científica, los elementos de calentamiento MoSi_2 se utilizan ampliamente en hornos experimentales de alta temperatura en laboratorios de ciencia de materiales, física y química, como analizadores termogravimétricos, calorímetros de barrido diferencial y equipos de síntesis de alta temperatura, para brindar apoyo al desarrollo de nuevos materiales. En las industrias refractarias y metalúrgicas, los elementos de calentamiento MoSi_2 se utilizan para el tratamiento de alta temperatura en procesos metalúrgicos y de sinterización refractaria, como la producción de metales y aleaciones de alta pureza, y su alta eficiencia y larga vida útil reducen los costos de producción.

En el campo de la energía y la protección del medio ambiente, los elementos de calentamiento MoSi_2 se utilizan en incineradores de alta temperatura, equipos de prueba de celdas de combustible de óxido sólido (SOFC) y sistemas de tratamiento térmico de residuos, lo que ayuda a lograr una producción limpia y una utilización eficiente de la energía. Los elementos calefactores de MoSi_2 se benefician de las mejoras en las propiedades de sus materiales y su tecnología de fabricación. Cada industria tiene requisitos de rendimiento diferentes. Por ejemplo, las industrias de la cerámica y el vidrio priorizan la estabilidad y la durabilidad a altas temperaturas, mientras que la industria de los semiconductores prioriza la alta pureza y la precisión en el control de la temperatura. En el futuro, dado que diversas industrias exigen mayores requisitos de rendimiento para los equipos de alta temperatura, se espera que los elementos calefactores de MoSi_2 logren avances en más campos mediante la optimización de materiales y la innovación de procesos.

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

Capítulo 2 Características de los elementos calefactores de MoSi₂ y sus factores influyentes

2.1 Propiedades físicas de los elementos calefactores de MoSi₂

El disiliciuro de molibdeno (MoSi₂) es un compuesto intermetálico que combina las características de los metales y la cerámica. Sus propiedades físicas determinan su excelente rendimiento como elemento calefactor de alta temperatura. La estructura cristalina del MoSi₂ es tetragonal de tipo α (tipo C11b) con un grupo espacial de I4/mmm, que presenta alta simetría y estabilidad. Su punto de fusión es de aproximadamente 2030°C, lo que le permite mantener la integridad estructural a temperaturas extremadamente altas. La densidad es de 6,24 g/cm³, que es relativamente baja, lo que ayuda a reducir el peso del elemento calefactor y es adecuado para el diseño de formas complejas. El coeficiente de expansión térmica del MoSi₂ es de aproximadamente $8,1 \times 10^{-6} \text{ K}^{-1}$ (temperatura ambiente a 1000°C), que se adapta bien a los materiales de matriz cerámica comunes (como la alúmina y la zirconia), lo que reduce el riesgo de agrietamiento causado por el estrés térmico.

El MoSi₂ tiene una potencia de aproximadamente 45 W/(m·K) a temperatura ambiente y disminuye gradualmente al aumentar la temperatura. Sin embargo, aún puede transferir calor eficazmente a altas temperaturas para garantizar un calentamiento uniforme del elemento calefactor. Presenta una alta dureza, con una dureza Vickers de aproximadamente 1200 HV, y buena resistencia al desgaste. Sin embargo, su fragilidad a bajas temperaturas (tenacidad a la fractura de aproximadamente 2-3 MPa·m^{1/2}) lo hace susceptible a daños por impacto mecánico. La resistencia a la oxidación del MoSi₂ es particularmente excepcional en atmósferas oxidantes de alta temperatura. Por encima de los 800 °C, se genera una densa película protectora de SiO₂ en la superficie, lo que previene eficazmente la difusión de oxígeno y protege la estructura interna de la erosión por oxidación. Esta característica le permite funcionar durante mucho tiempo en una atmósfera oxidante, con una temperatura máxima de funcionamiento de hasta 1850 °C.

El MoSi₂ se ve afectado por muchos factores. La pureza de las materias primas es clave. El MoSi₂ de alta pureza puede reducir el debilitamiento del límite de grano causado por impurezas y mejorar las propiedades mecánicas y la resistencia a la oxidación. Los procesos de preparación, como la sinterización por prensado en caliente o la sinterización por reacción, afectarán la densidad del material. A mayor densidad, mejor resistencia a la oxidación y conductividad térmica. La modificación con dopaje (como la adición de Al, W o tierras raras) puede mejorar su fragilidad a baja temperatura y sus propiedades de fluencia a alta temperatura, pero puede reducir ligeramente la resistencia a la oxidación. Además, el entorno de trabajo (como el tipo de atmósfera y la frecuencia de los ciclos de temperatura) también tiene un efecto significativo en la estabilidad de las propiedades físicas. Por ejemplo, en una atmósfera reductora, la película protectora de SiO₂ puede fallar, lo que resulta en una degradación acelerada del material.

2.2 Resistividad de los elementos calefactores de MoSi₂

La resistividad de los elementos calefactores de MoSi₂ es el parámetro de rendimiento fundamental del MoSi₂ como material de calentamiento eléctrico, lo que afecta directamente la eficiencia de

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

calentamiento y la precisión del control de temperatura. La resistividad del MoSi_2 presenta características no lineales con los cambios de temperatura. A temperatura ambiente, su resistividad es de aproximadamente $2,0 \times 10^{-5} \Omega \cdot \text{cm}$. A medida que la temperatura aumenta, la resistividad aumenta gradualmente, alcanzando aproximadamente $4,0 \times 10^{-5}$ alrededor de los $1000 \text{ }^\circ\text{C}$. $\Omega \cdot \text{cm}$. Esta característica de coeficiente de temperatura positivo permite que el elemento calefactor de MoSi_2 ajuste automáticamente la potencia a altas temperaturas, evitando el sobrecalentamiento y mejorando la seguridad. Por encima de los $1000 \text{ }^\circ\text{C}$, la resistividad aumenta lentamente y se estabiliza, lo que facilita un control preciso de la temperatura en el rango de altas temperaturas.

El MoSi_2 se ve afectado por la composición del material, la microestructura y el entorno externo. La pureza y el contenido de impurezas de las materias primas tienen un efecto significativo en la resistividad. Por ejemplo, impurezas como el hierro y el aluminio aumentan la resistividad y reducen la estabilidad, mientras que el MoSi_2 de alta pureza presenta propiedades eléctricas más consistentes. El tamaño de grano y las características del límite de grano también son cruciales. Los tamaños de grano más pequeños suelen ir acompañados de una mayor resistencia del límite de grano, lo que resulta en una resistividad ligeramente mayor, pero con una mejor resistencia mecánica. El efecto del proceso de preparación en la resistividad también es significativo. El MoSi_2 preparado mediante sinterización por prensado en caliente presenta una mayor densidad, menos defectos en el límite de grano y una resistividad más baja y estable, mientras que las muestras sinterizadas por reacción pueden presentar una resistividad más alta debido a una mayor porosidad.

La modificación por dopaje es un medio importante para ajustar la resistividad del MoSi_2 . La adición de tungsteno (W) o niobio (Nb) puede reducir la resistividad y mejorar la conductividad a alta temperatura, pero puede sacrificar algunas propiedades antioxidantes. El dopaje con elementos de tierras raras (como Y_2O_3) estabiliza el cambio de resistividad con la temperatura al mejorar la estructura del límite de grano. La influencia del entorno de trabajo en la resistividad no puede ignorarse. En una atmósfera oxidante, la formación de una película protectora de SiO_2 tiene poco efecto en la resistividad, pero en un entorno reductor o de vacío, puede ocurrir volatilización de Si en la superficie, lo que hace que la resistividad aumente gradualmente, afectando la estabilidad a largo plazo.

de MoSi_2 deben optimizarse según las aplicaciones específicas. Por ejemplo, los hornos de sinterización de cerámica requieren una resistividad estable para garantizar un calentamiento uniforme, mientras que los hornos de tratamiento térmico de semiconductores requieren una resistividad menor para un aumento rápido de la temperatura. En aplicaciones prácticas, el diseño de adaptación de la resistividad del extremo frío (generalmente dopado con un material más conductor) y el extremo caliente puede mejorar la eficiencia general y reducir la pérdida de energía.

2.3 Características de resistencia a altas temperaturas de los elementos calefactores MoSi_2

de disiliciuro de molibdeno (MoSi_2) son una de las propiedades fundamentales de los materiales de calefacción eléctrica, lo que afecta directamente su eficiencia de calentamiento, la precisión del control de temperatura y la vida útil. En el rango de alta temperatura, la resistividad del MoSi_2 muestra una

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

relativa estabilidad. En comparación con el rápido aumento de la temperatura desde la temperatura ambiente hasta los 1000 °C, el aumento de la resistividad en la sección de alta temperatura se ralentiza significativamente. Por ejemplo, a temperatura ambiente, la resistividad del MoSi₂ es de aproximadamente $2,0 \times 10^{-5} \Omega \cdot \text{cm}$, y aumenta a aproximadamente $4,0 \times 10^{-5}$ a 1000 °C $\Omega \cdot \text{cm}$, mientras que a 1500 °C es de aproximadamente $4,5 \times 10^{-5} \Omega \cdot \text{cm}$, y luego cambia menos a medida que la temperatura aumenta. Esta propiedad de coeficiente de temperatura positivo (PTC) permite que MoSi₂ ajuste automáticamente la potencia de salida a altas temperaturas, evite el sobrecalentamiento y mejore la seguridad. Al mismo tiempo, proporciona un rendimiento estable para aplicaciones que requieren un control preciso de la temperatura, como la sinterización de cerámica y el tratamiento térmico de semiconductores. La estabilidad de las características de resistencia a altas temperaturas proviene de la estructura del compuesto intermetálico de MoSi₂, cuyo mecanismo conductor se basa principalmente en enlaces metálicos. Incluso a altas temperaturas, la vibración reticular mejorada conduce a una mayor dispersión de electrones y la conductividad se mantiene a un nivel alto. Sin embargo, la operación a alta temperatura a largo plazo puede causar una ligera deriva en la resistividad, que se debe principalmente a cambios en la composición causados por el crecimiento de la película protectora de SiO₂ superficial o la volatilización de trazas de Si, así como a la evolución microestructural inducida por el estrés térmico (como el crecimiento del grano o el debilitamiento del límite de grano).

Los factores que afectan las propiedades de resistencia a altas temperaturas incluyen la pureza del material, la modificación mediante dopaje y el entorno de trabajo. El MoSi₂ de alta pureza puede reducir la inestabilidad de la resistencia causada por impurezas (como Fe y Al) y garantizar la consistencia del rendimiento eléctrico. El dopaje con elementos metálicos (como W y Nb) puede reducir la resistividad y mejorar la conductividad a altas temperaturas, pero puede reducir ligeramente la resistencia a la oxidación. Por otro lado, el dopaje con tierras raras (como Y₂O₃) estabiliza la variación de la resistividad con la temperatura optimizando la estructura del límite de grano. En una atmósfera oxidante, la película protectora de SiO₂ tiene poco efecto sobre la resistividad, pero en un entorno reductor o de vacío, la volatilización del Si provocará un aumento gradual de la resistividad y acelerará el envejecimiento del componente. El proceso de preparación también influye considerablemente en las características de resistencia. El MoSi₂ preparado mediante sinterización por prensado en caliente presenta una alta densidad, menos defectos en el límite de grano y características de resistencia más estables, mientras que las muestras sinterizadas por reacción con mayor porosidad pueden presentar una degradación del rendimiento debido a la irregularidad de la corriente local. En aplicaciones prácticas, el extremo frío suele doparse con materiales altamente conductores para reducir la resistencia. Optimizar la adaptación de la resistencia entre ambos extremos puede mejorar la eficiencia energética. El mantenimiento regular y evitar ciclos de temperatura extremos contribuyen a mantener la estabilidad a largo plazo de las características de las resistencias de alta temperatura.

2.4 Resistencia a la oxidación a alta temperatura de los elementos calefactores MoSi₂

La resistencia a la oxidación a alta temperatura de los elementos calefactores de disiliciuro de molibdeno es la característica clave para un funcionamiento estable a largo plazo en una atmósfera oxidante, lo que lo convierte en el material preferido para hornos eléctricos de alta temperatura. Por encima de los 800 °C,

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

se formará rápidamente una densa película protectora de dióxido de silicio (SiO_2) sobre la superficie del MoSi_2 . Esta película tiene un bajo coeficiente de difusión de oxígeno y una buena capacidad de autorreparación, lo que impide eficazmente que el oxígeno penetre en el interior y protege el sustrato de la corrosión por oxidación. Su reacción de oxidación es: $2\text{MoSi}_2 + 7\text{O}_2 \rightarrow 2\text{MoO}_3 + 4\text{SiO}_2$, donde el MoO_3 se volatiliza a altas temperaturas y el SiO_2 restante forma una capa protectora continua. En el rango de 1200-1850 °C, esta película protectora permite que el MoSi_2 funcione de forma estable durante un largo periodo en una atmósfera oxidante, lo que lo hace adecuado para procesos de alta temperatura como la sinterización de cerámica y la fusión de vidrio. Sin embargo, en el rango de baja temperatura de 400-700 °C, el MoSi_2 tiende a formar una mezcla no protectora de MoO_3 y SiO_2 , lo que resulta en la pulverización del material, especialmente en ciclos de temperatura frecuentes. Para evitar este problema, este rango de temperatura suele superarse rápidamente en aplicaciones prácticas. El MoSi_2 tiene poca resistencia a la oxidación en una atmósfera reductora (como H_2) o en un entorno de vacío, porque la película protectora de SiO_2 no se puede formar o se destruye, lo que resulta en la volatilización del Si y la degradación del material, por lo que no es adecuado para tales entornos. Los factores que afectan la resistencia a la oxidación a alta temperatura incluyen la pureza del material, la microestructura y la modificación por dopaje. El MoSi_2 de alta pureza puede reducir la oxidación del límite de grano causada por impurezas y mejorar la densidad de las películas de SiO_2 . Las microestructuras densas (como las que se obtienen mediante prensado en caliente y sinterización) pueden reducir las vías de difusión del oxígeno y mejorar la resistencia a la oxidación. El dopaje con elementos de tierras raras (como Y_2O_3) u óxidos puede mejorar la adhesión y la capacidad de autocuración de las películas de SiO_2 , mientras que algunos dopajes metálicos (como W) pueden reducir la resistencia a la oxidación al cambiar la cinética de oxidación. La humedad del entorno de trabajo también puede afectar la resistencia a la oxidación. En entornos con alta humedad, las películas de SiO_2 pueden experimentar reacciones de hidratación, lo que reduce su efecto protector. Para mejorar la resistencia a la oxidación a altas temperaturas, los elementos calefactores modernos de MoSi_2 suelen utilizar tecnología de recubrimiento superficial (como recubrimientos de Al_2O_3 o ZrO_2) para potenciar el efecto protector o para mejorar la densidad del material optimizando el proceso de sinterización. En la práctica, mantener una atmósfera oxidante estable y evitar ciclos frecuentes de baja temperatura son clave para prolongar la vida útil del antioxidante.

2.5 Conductividad térmica y difusividad térmica de elementos calefactores de MoSi_2

La conductividad térmica y la difusividad térmica de los elementos calefactores de MoSi_2 son indicadores importantes de su conductividad térmica, que afectan directamente la velocidad de calentamiento, la uniformidad de la temperatura y la eficiencia energética. La conductividad térmica del MoSi_2 es de aproximadamente $45 \text{ W}/(\text{m}\cdot\text{K})$ a temperatura ambiente y disminuye gradualmente con el aumento de la temperatura hasta aproximadamente $25 \text{ W}/(\text{m}\cdot\text{K})$ a 1000 °C, y desciende aún más hasta aproximadamente $15 \text{ W}/(\text{m}\cdot\text{K})$ a 1500 °C. Aunque la conductividad térmica disminuye a altas temperaturas, el MoSi_2 puede transferir eficazmente el calor y garantizar una distribución uniforme de la temperatura en el horno, lo cual es adecuado para aplicaciones como la sinterización de cerámica y la fusión de vidrio que requieren una alta uniformidad térmica. El cambio en la conductividad térmica se debe principalmente a la vibración reticular y al mecanismo de conductividad térmica electrónica del MoSi_2 . A bajas temperaturas, la conductividad térmica electrónica es dominante, mientras que a altas

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

temperaturas, la mayor dispersión de fonones provoca una disminución de la conductividad térmica. La difusividad térmica del MoSi_2 ($\alpha = k / (\rho \cdot c)$), donde k es la conductividad térmica, ρ es la densidad y c es la capacidad calorífica específica) también varía con la temperatura.

A temperatura ambiente, la capacidad calorífica específica de MoSi_2 es de aproximadamente $0,45 \text{ J}/(\text{g} \cdot \text{K})$, la densidad es de $6,24 \text{ g}/\text{cm}^3$ y el coeficiente de difusión térmica es de aproximadamente $1,6 \times 10^{-5} \text{ m}^2/\text{s}$; a altas temperaturas, la capacidad calorífica específica aumenta ligeramente y el coeficiente de difusión térmica disminuye debido a la disminución de la conductividad térmica. Los factores que afectan la conductividad térmica y el coeficiente de difusión térmica incluyen la pureza del material, la microestructura y la modificación por dopaje. Las impurezas (como Fe y C) aumentan la dispersión de fonones y reducen la conductividad térmica, mientras que el MoSi_2 de alta pureza tiene una conductividad térmica más alta. El MoSi_2 con alta densidad (como las muestras sinterizadas prensadas en caliente) tiene una conductividad térmica más alta, mientras que las muestras con alta porosidad tienen una conductividad térmica más baja debido a la dispersión de calor de los poros.

El efecto de la modificación por dopaje es complejo. Añadir W puede aumentar ligeramente la conductividad térmica, mientras que el dopaje con óxidos de tierras raras puede reducirla debido a la dispersión en los límites de grano. En aplicaciones prácticas, la conductividad y la difusividad térmicas deben optimizarse según el tipo de horno y el proceso. Por ejemplo, los hornos de tratamiento térmico de semiconductores requieren una mayor conductividad térmica para lograr un calentamiento rápido, mientras que los hornos de sinterización de cerámica de gran tamaño priorizan la uniformidad térmica. Optimizar el proceso de preparación (como aumentar la densidad) y diseñar racionalmente la forma de los componentes (como aumentar la superficie del extremo caliente) puede mejorar la conductividad térmica y reducir la pérdida de energía.

2.6 Estabilidad al choque térmico de los elementos calefactores de MoSi_2

de disiliciuro de molibdeno (MoSi_2) se refieren a su capacidad para resistir el agrietamiento o la fractura inducidos por la tensión térmica bajo cambios rápidos de temperatura, y es un indicador importante para evaluar su fiabilidad en entornos de ciclos de alta temperatura. La estabilidad al choque térmico del MoSi_2 está estrechamente relacionada con su bajo coeficiente de expansión térmica y conductividad térmica moderada. Estas características permiten que el MoSi_2 disperse mejor la tensión térmica durante el calentamiento y enfriamiento rápidos, y reduce la concentración de tensión interna causada por gradientes de temperatura. Sin embargo, la fragilidad a baja temperatura del MoSi_2 aún puede causar microfisuras o fracturas en condiciones severas de choque térmico, especialmente en ciclos frecuentes de alta y baja temperatura. El rendimiento de la estabilidad al choque térmico afecta directamente la vida útil y la fiabilidad de los elementos calefactores de MoSi_2 en aplicaciones como hornos de sinterización de cerámica y hornos de fusión de vidrio que requieren un calentamiento o enfriamiento rápido. Los principales factores que afectan a la estabilidad al choque térmico incluyen la pureza del material, la microestructura y el proceso de preparación. El MoSi_2 de alta pureza puede reducir el debilitamiento del límite de grano causado por impurezas (como Fe y Al), reduciendo así el riesgo de propagación de grietas inducidas por choque térmico. En términos de microestructura, el MoSi_2 denso (como el preparado

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

mediante prensado en caliente y sinterización) presenta menos poros y defectos y puede dispersar eficazmente la tensión térmica, mientras que las muestras con mayor porosidad son propensas a la concentración local de tensiones bajo choque térmico, lo que provoca agrietamiento. La modificación con dopaje también tiene un efecto significativo en la estabilidad al choque térmico. Por ejemplo, la adición de óxidos de tierras raras (como Y_2O_3) u óxido de aluminio (Al_2O_3) puede aumentar la resistencia del límite de grano y mejorar la resistencia al choque térmico, mientras que algunos dopajes metálicos (como W) pueden reducir ligeramente la estabilidad al choque térmico debido a cambios en las características de expansión térmica. La tasa de cambio de temperatura y la frecuencia de los ciclos en el entorno de trabajo son factores externos clave. Los ciclos rápidos de choque térmico (como una caída repentina de $1500\text{ }^\circ\text{C}$ a temperatura ambiente) agravarán la acumulación de tensión térmica y acortarán la vida útil del componente. En aplicaciones prácticas, optimizar la estrategia de control de temperatura en el horno (como un aumento y descenso lentos de la temperatura) y diseñar una forma adecuada del componente (como evitar bordes afilados para reducir la concentración de tensiones) puede mejorar significativamente la estabilidad al choque térmico. Además, la tecnología de recubrimiento superficial (como el recubrimiento de SiC o Al_2O_3) puede mejorar aún más la resistencia al choque térmico del $MoSi_2$ y prolongar su vida útil.

2.7 Estabilidad al choque térmico de los elementos calefactores de $MoSi_2$

La estabilidad al choque térmico de los elementos calefactores de $MoSi_2$ se refiere a su capacidad para resistir el agrietamiento o la degradación del rendimiento bajo gradientes de temperatura extremos o choques térmicos instantáneos (como la exposición directa al aire frío o refrigeración líquida). Está estrechamente relacionada con la estabilidad al choque térmico, pero enfatiza los cambios de temperatura instantáneos y drásticos. La estabilidad al choque térmico del $MoSi_2$ se beneficia de su bajo coeficiente de expansión térmica y su moderada conductividad térmica, que en conjunto permiten al material dispersar mejor las tensiones térmicas en cambios instantáneos de temperatura. Sin embargo, debido a su baja tenacidad a la fractura, el $MoSi_2$ puede experimentar propagación de microfisuras o incluso fracturas macroscópicas bajo condiciones severas de choque térmico, especialmente en el rango de temperaturas límite de $400\text{-}700\text{ }^\circ\text{C}$, donde el choque térmico puede agravar la oxidación y la pulverización, provocando el fallo del material. La estabilidad al choque térmico es fundamental para la aplicación de elementos calefactores de $MoSi_2$ en hornos de alta temperatura con arranque y parada rápidos o en entornos de calentamiento no uniforme, como en procesos de conformado de vidrio o tratamiento térmico de metales. Los factores que afectan la estabilidad del choque térmico incluyen la composición del material, la microestructura y el entorno externo.

El $MoSi_2$ con mayor pureza puede reducir la concentración de tensiones causada por impurezas en los límites de grano y mejorar la resistencia al choque térmico. Una microestructura densa (como la obtenida mediante prensado en caliente o sinterización reactiva) puede reducir eficazmente la propagación de grietas inducida por el choque térmico, mientras que las muestras con mayor porosidad presentan una menor estabilidad al choque térmico debido a un mayor número de defectos. La modificación con dopaje tiene un doble efecto en la estabilidad al choque térmico. Por ejemplo, la adición de tierras raras (como La_2O_3) puede mejorar la unión de los límites de grano y la resistencia al agrietamiento, mientras que el

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

dopaje con ciertos metales puede reducir la estabilidad debido a un desajuste por expansión térmica. La intensidad del choque térmico (como la inyección de aire frío o la refrigeración líquida) y el número de ciclos en el entorno de trabajo pueden afectar significativamente el rendimiento. Un choque térmico severo puede provocar el agrietamiento de la película protectora superficial de SiO_2 y reducir la resistencia a la oxidación. En aplicaciones prácticas, la optimización del diseño de los componentes (como el uso de estructuras en forma de U o de W para aumentar la dispersión de la tensión térmica) y el control de las condiciones de choque térmico (como evitar la exposición directa a medios fríos) pueden mejorar la estabilidad al choque térmico. Además, las tecnologías de modificación de superficies (como el recubrimiento con recubrimientos cerámicos de alta tenacidad) pueden mejorar la resistencia al choque térmico de MoSi_2 y reducir la propagación de grietas.

2.8 Rendimiento de fatiga térmica de los elementos calefactores de MoSi_2

El rendimiento de los elementos calefactores de MoSi_2 frente a la fatiga térmica se refiere a su capacidad para resistir la degradación del rendimiento (como el aumento de la resistividad, la disminución de la resistencia mecánica o la degradación de la película protectora superficial) bajo ciclos repetidos de alta y baja temperatura, y es un indicador clave para evaluar su fiabilidad a largo plazo. El rendimiento de MoSi_2 frente a la fatiga térmica se ve afectado conjuntamente por su bajo coeficiente de expansión térmica, su conductividad térmica moderada y su resistencia a la oxidación a alta temperatura. En una atmósfera oxidante, la película protectora de SiO_2 formada sobre la superficie de MoSi_2 puede permanecer estable durante múltiples ciclos térmicos y ralentizar la degradación del material. Sin embargo, durante el proceso de fatiga térmica, las tensiones térmicas y mecánicas repetidas pueden provocar la iniciación y expansión de microfisuras, especialmente en elementos de MoSi_2 con una fragilidad significativa a baja temperatura, donde la fatiga térmica puede provocar la fractura del componente o una desviación del rendimiento eléctrico. Además, en el rango de temperatura de "plaga" de 400 a 700 °C, los ciclos de fatiga térmica pueden agravar la pulverización por oxidación y acelerar el fallo del material. El rendimiento de la fatiga térmica afecta directamente la vida útil de los elementos calefactores de MoSi_2 en aplicaciones como la sinterización de cerámica y el tratamiento térmico de metales, que requieren ciclos térmicos frecuentes. Los factores que afectan el rendimiento de la fatiga térmica incluyen la pureza del material, la microestructura, la modificación por dopaje y el entorno de trabajo.

El MoSi_2 de alta pureza puede reducir el debilitamiento de los límites de grano causado por impurezas y reducir el riesgo de grietas por fatiga térmica. Las microestructuras densas (como las muestras sinterizadas prensadas en caliente) pueden dispersar eficazmente la tensión térmica cíclica y mejorar la vida útil por fatiga térmica, mientras que las muestras con mayor porosidad son propensas a fallar debido a la concentración de tensiones. La modificación con dopaje tiene una influencia importante en el rendimiento por fatiga térmica. Por ejemplo, la adición de óxidos de tierras raras (como Y_2O_3) o alúmina puede mejorar la resistencia de los límites de grano e inhibir la propagación de grietas, mientras que algunos dopajes metálicos pueden reducir el rendimiento por fatiga térmica debido al desajuste de la expansión térmica. La amplitud, la frecuencia y el tipo de atmósfera del ciclo térmico en el entorno de trabajo tienen un impacto significativo en el rendimiento por fatiga térmica. Por ejemplo, en un entorno

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

reductor o de vacío, la falla de la película protectora de SiO_2 causará la volatilización del Si y acelerará la degradación por fatiga térmica. En aplicaciones prácticas, optimizar los parámetros del ciclo térmico (como reducir la velocidad de calentamiento y enfriamiento), mejorar el diseño de los componentes (como aumentar la resistencia del extremo caliente) y usar tecnología de recubrimiento superficial (como recubrimientos de SiC o ZrO_2) puede mejorar significativamente el rendimiento frente a la fatiga térmica. La inspección y el mantenimiento regulares también pueden prolongar eficazmente la vida útil frente a la fatiga térmica de los elementos calefactores de MoSi_2 .

2.9 Estado de la superficie del elemento calefactor MoSi_2

de disiliciuro de molibdeno (MoSi_2) tienen una influencia importante en su rendimiento a alta temperatura, vida útil y fiabilidad. Las características de la superficie del MoSi_2 se reflejan principalmente en su película de óxido de SiO_2 formada naturalmente, la microestructura de la superficie y el rendimiento del revestimiento protector aplicado. En una atmósfera oxidante de alta temperatura, se generará una densa película protectora de SiO_2 sobre la superficie del MoSi_2 por encima de los 800°C . Esta película es la clave de su excelente resistencia a la oxidación, que puede prevenir eficazmente la difusión de oxígeno hacia el interior y proteger el sustrato de la corrosión por oxidación. Sin embargo, el estado de la superficie no solo se ve afectado por la película de óxido, sino que también está estrechamente relacionado con los defectos de la superficie (como microfisuras, poros), la calidad del revestimiento y la evolución de la superficie durante el uso a largo plazo. El estado de la superficie del MoSi_2 determina directamente su estabilidad bajo ciclos de alta temperatura, choque térmico y condiciones de fatiga térmica, especialmente en aplicaciones de alta demanda como la sinterización de cerámica, la fusión de vidrio y el tratamiento térmico de semiconductores.

El MoSi_2 de alta pureza puede reducir el debilitamiento de los límites de grano causado por impurezas superficiales (como Fe y Al) y generar una superficie más uniforme y densa. Película de SiO_2 . Los procesos de preparación como la sinterización por prensado en caliente o la sinterización por reacción tienen un efecto significativo en la rugosidad y porosidad de la superficie. La superficie del MoSi_2 preparado mediante sinterización por prensado en caliente es más lisa y tiene menos defectos, lo que favorece la formación de una película de óxido estable, mientras que las muestras sinterizadas por reacción pueden reducir el efecto protector debido a un mayor número de poros en la superficie. El tipo de atmósfera, la humedad y la frecuencia de los ciclos de temperatura en el entorno de trabajo también afectarán el estado de la superficie. Por ejemplo, un entorno con alta humedad puede provocar que la película de SiO_2 se hidrate y reduzca su capacidad protectora, mientras que los ciclos de temperatura frecuentes pueden provocar grietas en la superficie o desprendimiento del revestimiento. Para optimizar el estado de la superficie, los elementos calefactores modernos de MoSi_2 suelen mejorar la resistencia a la oxidación y la durabilidad mediante la modificación de la superficie (como la tecnología de revestimiento) o la optimización del proceso (como el pulido de la superficie).

La estabilidad a largo plazo del estado de la superficie es crucial para el rendimiento de los elementos calefactores de MoSi_2 . Durante el funcionamiento prolongado a altas temperaturas, la película superficial de SiO_2 puede adelgazarse debido a la volatilización de Si o MoO_3 , especialmente en entornos reductores

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

o de vacío, lo que reduce significativamente la capacidad de protección de la superficie. Además, la aparición y propagación de microfisuras superficiales puede verse agravada por la tensión térmica o mecánica, especialmente en condiciones de choque térmico o fatiga térmica. En la práctica, la inspección regular del estado de la superficie, la optimización de las velocidades de calentamiento y enfriamiento, y el uso de recubrimientos protectores son medidas eficaces para mantener el rendimiento superficial de los elementos calefactores de MoSi_2 . En el futuro, con el desarrollo de la tecnología de ingeniería de superficies, la optimización del estado de la superficie del MoSi_2 se convertirá en una dirección importante para mejorar su rendimiento integral.

2.9.1 Tipos de recubrimientos protectores comúnmente utilizados

Para mejorar aún más la resistencia a la oxidación, la estabilidad al choque térmico y el rendimiento de fatiga térmica de los elementos de calentamiento de disiliciuro de molibdeno, la tecnología de recubrimiento de superficies se usa ampliamente en elementos MoSi_2 . Los tipos comunes de recubrimientos protectores incluyen recubrimientos de óxido, recubrimientos de carburo y recubrimientos compuestos, cada uno de los cuales apunta a requisitos de rendimiento específicos y entornos de aplicación. Los recubrimientos de óxido son la opción más común, entre los cuales los recubrimientos de óxido de aluminio (Al_2O_3) y óxido de circonio (ZrO_2) son los preferidos debido a su alto punto de fusión, estabilidad química y bajo coeficiente de difusión de oxígeno. Los recubrimientos de Al_2O_3 se aplican mediante pulverización de plasma o deposición química de vapor (CVD) para formar una capa protectora densa a altas temperaturas, mejorando significativamente la resistencia a la oxidación y la resistencia al choque térmico de MoSi_2 , especialmente para atmósferas oxidantes de 1500-1800 °C.

ZrO_2 se utilizan a menudo en aplicaciones que requieren una alta estabilidad al choque térmico, como los componentes aeroespaciales de alta temperatura, gracias a sus excelentes propiedades de barrera térmica. Los recubrimientos de carburo son principalmente de carburo de silicio (SiC), ya que sus coeficientes de expansión térmica coinciden bien con los del sustrato de MoSi_2 , lo que puede reducir la tensión térmica entre el recubrimiento y el sustrato y el riesgo de desconchado. Los recubrimientos de SiC se aplican mediante pulverización de plasma o procesos de sinterización reactiva, que no solo mejoran la resistencia a la oxidación, sino que también mejoran la resistencia al desgaste de la superficie, haciéndolos adecuados para su uso en entornos de alto desgaste como hornos de sinterización de cerámica. Los recubrimientos compuestos han sido el foco de desarrollo en los últimos años, como los recubrimientos compuestos $\text{Al}_2\text{O}_3 - \text{SiC}$ o $\text{ZrO}_2 - \text{Y}_2\text{O}_3$, que combinan las ventajas de múltiples materiales para proporcionar una protección más completa. Por ejemplo, los recubrimientos compuestos $\text{Al}_2\text{O}_3 - \text{SiC}$ combinan la alta resistencia a la oxidación del Al_2O_3 y la resistencia al choque térmico del SiC , haciéndolos adecuados para componentes MoSi_2 en condiciones de trabajo complejas.

La elección del tipo de recubrimiento debe optimizarse según el entorno de aplicación específico. Por ejemplo, los hornos de tratamiento térmico de semiconductores requieren recubrimientos de alta pureza para evitar la contaminación, mientras que los hornos de fundición de vidrio priorizan la resistencia al choque térmico y a la corrosión del recubrimiento. El proceso de preparación del recubrimiento también influye significativamente en su rendimiento. La pulverización de plasma permite formar recubrimientos

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

gruesos y densos, ideales para aplicaciones industriales, mientras que el proceso de CVD produce recubrimientos más uniformes y delgados con mayor adhesión, ideales para requisitos de alta precisión. Además, el espesor y la uniformidad del recubrimiento requieren un control preciso.

Un recubrimiento demasiado grueso puede agrietarse debido a un desajuste de la tensión térmica, y un recubrimiento demasiado delgado puede no proporcionar la protección adecuada. En el futuro, se espera que el desarrollo de recubrimientos nanoestructurados y recubrimientos compuestos multicapa mejore aún más el rendimiento superficial de los elementos calefactores de MoSi₂.

2.9.2 Estudio de grietas superficiales y adherencia del recubrimiento

Las grietas superficiales y la adhesión del recubrimiento de los elementos calefactores de MoSi₂ son factores clave que afectan su estado superficial y su fiabilidad a largo plazo. Las grietas superficiales suelen estar causadas por tensión térmica, tensión mecánica o defectos de fabricación, especialmente en condiciones de choque térmico o fatiga térmica. La fragilidad del MoSi₂ a baja temperatura (la tenacidad a la fractura es de aproximadamente 2-3 MPa·m^{1/2}) facilita la formación de microgrietas ante cambios bruscos de temperatura o vibraciones mecánicas. Estas grietas pueden extenderse a lo largo de los límites de grano, provocando la fractura del componente o el fallo de la película protectora de SiO₂. En el rango de temperatura límite de 400-700 °C, las grietas superficiales pueden agravar la oxidación y la formación de polvo, deteriorando aún más el estado de la superficie. La adhesión del recubrimiento determina si este se adhiere al sustrato de MoSi₂ durante un tiempo prolongado para evitar su desprendimiento o agrietamiento. Los recubrimientos con adhesión insuficiente son propensos a desprenderse durante ciclos de alta temperatura, exponiendo el sustrato a ambientes de oxidación o corrosión, reduciendo así la vida útil del componente. La formación de grietas superficiales se ve afectada por muchos factores. La pureza del material es un factor importante. El MoSi₂ de alta pureza puede reducir las impurezas en los límites de grano y la probabilidad de inicio de grietas. La microestructura tiene un efecto significativo en la propagación de grietas. El MoSi₂ denso (como el sinterizado por prensado en caliente) tiene menos poros y defectos, lo que puede inhibir eficazmente la propagación de grietas, mientras que las muestras con mayor porosidad son propensas al agrietamiento debido a la concentración de tensiones. La modificación con dopaje puede mejorar la resistencia a las grietas superficiales. Por ejemplo, la adición de óxidos de tierras raras (como el Y₂O₃) puede mejorar la fuerza de unión en los límites de grano y reducir la propagación de grietas, mientras que ciertos dopajes metálicos (como el W) pueden aumentar el riesgo de grietas debido a la discrepancia en la expansión térmica. El proceso de preparación y el tratamiento de la superficie también son cruciales. El pulido de la superficie puede reducir los defectos iniciales, mientras que las superficies rugosas pueden convertirse en puntos de inicio de grietas.

La investigación sobre la adhesión de recubrimientos se centra principalmente en las características de la interfaz, la adaptación de la expansión térmica y el proceso de recubrimiento. La diferencia en el coeficiente de expansión térmica entre MoSi₂ y recubrimientos (como Al₂O₃ y SiC) causará tensión térmica en la interfaz, afectando la adhesión. Por ejemplo, los recubrimientos de SiC suelen ser mejores que los de Al₂O₃ porque sus coeficientes de expansión térmica son más cercanos a los de MoSi₂. La tecnología de tratamiento de interfaz (como el diseño de la capa de transición) puede mejorar

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

significativamente la adhesión. Por ejemplo, agregar una capa de transición de SiC entre el sustrato de MoSi₂ y el recubrimiento de Al₂O₃ puede aliviar la adaptación de la tensión térmica. El proceso de recubrimiento también tiene una influencia importante en la adhesión. El recubrimiento formado por pulverización de plasma tiene una fuerte adhesión, pero puede haber microporos, mientras que el recubrimiento generado por el proceso de CVD es más uniforme y tiene mayor adhesión. El ciclo térmico y los factores ambientales (como la humedad y la atmósfera) probarán aún más la adhesión. Un ambiente de alta humedad puede causar reacciones químicas en la interfaz del recubrimiento y reducir la adhesión. Los estudios han demostrado que optimizar el espesor del recubrimiento y el diseño de la interfaz (como el recubrimiento en gradiente) puede mejorar significativamente la adhesión y reducir el riesgo de grietas y desprendimientos.

2.9.3 Formación y protección de la película de óxido de SiO₂ superficial

de SiO₂ sobre la superficie del elemento calefactor de MoSi₂ es la base de su resistencia a la oxidación a altas temperaturas, lo que determina su estabilidad a largo plazo y su vida útil en atmósferas oxidantes. Por encima de 800 °C, la superficie de MoSi₂ reacciona $2\text{MoSi}_2 + 7\text{O}_2 \rightarrow 2\text{MoO}_3 + 4\text{SiO}_2$, generando una densa película de SiO₂. Esta película tiene un bajo coeficiente de difusión de oxígeno y una buena capacidad de autorreparación, lo que impide eficazmente la penetración de oxígeno en el sustrato y protege al MoSi₂ de una mayor erosión por oxidación. En el rango de 1200 a 1850 °C, la película de SiO₂ permanece estable, lo que permite que el elemento calefactor de MoSi₂ funcione durante mucho tiempo en atmósferas oxidantes a alta temperatura. La temperatura máxima de funcionamiento puede alcanzar los 1850 °C y se utiliza ampliamente en sinterización de cerámica, fundición de vidrio y otros procesos. Sin embargo, en el rango de temperatura de "plaga" de 400 a 700 °C, el MoSi₂ se oxida, generando una mezcla no protectora de MoO₃ y SiO₂, lo que resulta en una película suelta y la pulverización del material, lo que afecta gravemente la protección de la superficie. Para evitar la "plaga", este rango de temperatura suele superarse rápidamente en aplicaciones prácticas.

de SiO₂ se ven afectadas por muchos factores. La pureza del material es crucial para la calidad de la película. El MoSi₂ de alta pureza puede producir una película de SiO₂ más densa y uniforme, mientras que las impurezas (como Fe y Al) pueden causar defectos en la película y reducir el efecto protector. La microestructura también juega un papel importante. El MoSi₂ denso (como la sinterización por prensado en caliente) tiene menos poros superficiales, lo que favorece la formación de una película de SiO₂ continua, mientras que las muestras con alta porosidad pueden formar una capa de película desigual y reducir la resistencia a la oxidación. La modificación con dopaje tiene un doble efecto en el rendimiento de las películas de SiO₂. Los óxidos de tierras raras (como Y₂O₃) pueden mejorar la adhesión y la estabilidad de la película, mientras que ciertos dopajes metálicos (como W) pueden reducir la calidad de la película debido a cambios en la cinética de oxidación. La atmósfera y la humedad en el entorno de trabajo tienen un efecto significativo en la formación y protección de las películas de SiO₂. En un entorno de alta humedad, la película de SiO₂ puede sufrir reacciones de hidratación, formando una estructura de silicato laxa, lo que reduce su capacidad protectora. En un entorno reductor o de vacío, la película de SiO₂ no se puede formar o se destruye, lo que provoca la volatilización del Si y la degradación del sustrato. La película de SiO₂ es clave para el rendimiento del elemento calefactor MoSi₂. Durante el

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

funcionamiento prolongado a altas temperaturas, la película de SiO₂ puede adelgazarse debido a la volatilización de Si o MoO₃; especialmente a temperaturas extremas cercanas a los 1850 °C, la capa de película puede dañarse parcialmente. Los ciclos térmicos frecuentes también pueden provocar que la capa de película se agriete o se desprenda, lo que reduce su efecto protector. Para mejorar la estabilidad de la película de SiO₂, los elementos modernos de MoSi₂ suelen utilizar tecnología de modificación de la superficie, como el tratamiento de preoxidación para formar una capa de película densa inicial, o añadir revestimientos protectores (como Al₂O₃ o SiC) para mejorar la resistencia al choque térmico y la durabilidad de la película. En la práctica, mantener una atmósfera oxidante estable, evitar entornos con alta humedad y optimizar los parámetros del ciclo térmico son medidas eficaces para mantener el rendimiento protector de la película de SiO₂. En el futuro, las direcciones de investigación pueden centrarse en optimizar la cinética de formación de la película de SiO₂ y desarrollar capas protectoras compuestas para mejorar aún más el rendimiento de la superficie y la vida útil de los elementos de calentamiento de MoSi₂.

2.10 Problemas de superficie de los elementos calefactores de MoSi₂ y sus soluciones

de disiliciuro de molibdeno (MoSi₂) son factores importantes que afectan su rendimiento a altas temperaturas y su vida útil, incluyendo principalmente grietas superficiales, oxidación por oxidación, degradación de la película protectora de SiO₂ y desprendimiento del recubrimiento. Estos problemas son especialmente significativos en ciclos de alta temperatura, choques térmicos o entornos con atmósferas específicas, lo que puede provocar la degradación del rendimiento del componente o incluso su fallo. Las grietas superficiales suelen estar causadas por estrés térmico, estrés mecánico o defectos de fabricación. La fragilidad del MoSi₂ a bajas temperaturas facilita la generación de microgrietas ante cambios bruscos de temperatura o vibraciones mecánicas, que posteriormente se expanden a macrogrietas, lo que debilita la resistencia a la oxidación y la resistencia mecánica. En el rango de temperatura de oxidación de 400 a 700 °C, la superficie del MoSi₂ se oxida, generando una mezcla no protectora de MoO₃ y SiO₂, lo que provoca la pulverización del material y graves daños en la superficie. Durante el funcionamiento prolongado a altas temperaturas, la película protectora de SiO₂ puede adelgazarse debido a la volatilización de Si o MoO₃. Especialmente a temperaturas extremas cercanas a 1850 °C, la película puede dañarse parcialmente, reduciendo así su efecto protector. El recubrimiento protector aplicado puede desprenderse debido a una discrepancia en la expansión térmica o a una unión insuficiente de la interfaz, exponiendo el sustrato a ambientes oxidativos o corrosivos.

El problema de las grietas superficiales se puede solucionar optimizando el proceso de preparación y la modificación del material. El proceso de sinterización por prensado en caliente puede mejorar la densidad del MoSi₂, reducir los poros y defectos superficiales y, por lo tanto, disminuir la probabilidad de formación de grietas. El dopaje con óxidos de tierras raras (como Y₂O₃) o alúmina puede mejorar la resistencia del límite de grano e inhibir la propagación de grietas. El pulido superficial puede reducir los defectos iniciales y la concentración de tensiones. Para combatir la oxidación por plagas, en aplicaciones prácticas, la temperatura suele elevarse rápidamente hasta un rango de 400-700 °C para reducir el tiempo de generación de óxidos no protectores. Además, el tratamiento de preoxidación puede generar previamente una película densa de SiO₂ en la superficie para mejorar su resistencia a las plagas. Para

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

mantener la estabilidad de la película de SiO_2 , se puede mejorar su adherencia añadiendo elementos de tierras raras o utilizando un recubrimiento compuesto para mejorar la resistencia al choque térmico y la durabilidad. Para el problema del desprendimiento del recubrimiento, optimizar el proceso de recubrimiento (como la deposición química de vapor o la pulverización de plasma) y el diseño de la interfaz (como la adición de una capa de transición de SiC) puede mejorar la resistencia de la unión y reducir el desajuste de la tensión térmica. En la práctica, controlar las velocidades de calentamiento y enfriamiento, evitar ambientes con alta humedad y revisar regularmente el estado de la superficie son medidas eficaces para prolongar la vida útil de los elementos calefactores de MoSi_2 .

En el futuro, la solución de los problemas de superficie podría centrarse en el desarrollo de recubrimientos nanoestructurados y recubrimientos compuestos multicapa para mejorar aún más la estabilidad de las películas de SiO_2 y su resistencia adhesiva. Además, la tecnología de monitorización inteligente permite detectar las condiciones de la superficie en tiempo real, ajustar los parámetros de funcionamiento a tiempo y prolongar la vida útil de los componentes. La aplicación integral de estos métodos puede mitigar eficazmente los problemas de superficie de los elementos calefactores de MoSi_2 y mejorar su fiabilidad en aplicaciones de alta temperatura, como la sinterización de cerámica y la fusión de vidrio.

2.11 Factores que afectan las propiedades termodinámicas de los elementos calefactores de MoSi_2

Las propiedades termodinámicas de los elementos calefactores MoSi_2 , incluyendo la conductividad térmica, el coeficiente de expansión térmica, la capacidad calorífica específica y la difusividad térmica, afectan directamente su eficiencia de calentamiento, uniformidad de temperatura y resistencia al choque térmico. Estas propiedades se ven afectadas por las propiedades intrínsecas del material (como la composición y la microestructura) y el entorno externo (como la temperatura de funcionamiento y la atmósfera). La conductividad térmica de MoSi_2 es de aproximadamente $45 \text{ W}/(\text{m}\cdot\text{K})$ a temperatura ambiente, y cae a aproximadamente $15 \text{ W}/(\text{m}\cdot\text{K})$ a alta temperatura (1500°C), lo que garantiza una buena capacidad de transferencia de calor, pero la disminución de la conductividad térmica con la temperatura afectará la rápida eficiencia de calentamiento. Su coeficiente de expansión térmica es de aproximadamente $8,1 \times 10^{-6} \text{ K}^{-1}$, que coincide bien con el material de matriz cerámica y reduce la tensión térmica, pero su fragilidad a baja temperatura hace que sea fácil de agrietar bajo choque térmico. El calor específico es de aproximadamente $0,45 \text{ J}/(\text{g}\cdot\text{K})$, que aumenta ligeramente a altas temperaturas, lo que afecta la difusividad térmica. Estas propiedades termodinámicas determinan conjuntamente el rendimiento del MoSi_2 en hornos de alta temperatura.

El MoSi_2 de alta pureza puede reducir la dispersión de fonones causada por impurezas (como Fe y C), mejorar la conductividad térmica, reducir los defectos del límite de grano y mejorar la distribución del estrés térmico. La microestructura tiene un efecto significativo en las propiedades termodinámicas. El MoSi_2 denso (como el preparado por prensado en caliente y sinterización) tiene mayor conductividad térmica y resistencia al choque térmico, mientras que las muestras con alta porosidad tienen un rendimiento deficiente debido al calor disperso y la concentración de estrés. La modificación del dopaje puede optimizar las propiedades termodinámicas. Por ejemplo, agregar W puede aumentar ligeramente

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

la conductividad térmica, pero puede aumentar el estrés térmico debido al desajuste de expansión térmica; el dopaje de óxido de tierras raras (como Y_2O_3) puede mejorar la resistencia del límite de grano y mejorar la resistencia al choque térmico. Los procesos de preparación como el prensado en caliente o la sinterización de reacción también tienen una influencia importante en las propiedades termodinámicas. Las muestras de alta densidad generalmente exhiben mejor conductividad térmica y resistencia al estrés térmico.

La influencia del entorno externo en las propiedades termodinámicas es crucial. La temperatura y la atmósfera de operación afectan directamente la conductividad térmica, la expansión térmica y la resistencia al choque térmico al modificar el estado superficial y la estructura interna del material. En la práctica, optimizar el diseño de los componentes (como aumentar la superficie del extremo caliente) y controlar las condiciones de operación (como estabilizar el gradiente de temperatura) puede mejorar el rendimiento termodinámico y satisfacer las necesidades de aplicaciones exigentes como la sinterización de cerámica y el tratamiento térmico de semiconductores.

2.11.1 Efecto de la temperatura de funcionamiento

La temperatura de trabajo es el factor central que afecta las propiedades termodinámicas de los elementos calefactores de $MoSi_2$, lo que determina directamente el rendimiento de su conductividad térmica, coeficiente de expansión térmica y resistencia al choque térmico. En el rango de temperatura ambiente a $1000^\circ C$, la conductividad térmica de $MoSi_2$ cae de aproximadamente $45 W/(m \cdot K)$ a aproximadamente $25 W/(m \cdot K)$, principalmente debido a la dispersión de fonones mejorada y la contribución reducida de la conductividad térmica electrónica a altas temperaturas. En el rango de alta temperatura de $1000-1850^\circ C$, la conductividad térmica cae aún más a aproximadamente $15 W/(m \cdot K)$, pero aún puede cumplir con los requisitos de transferencia de calor de aplicaciones tales como sinterización de cerámica y fusión de vidrio. El coeficiente de expansión térmica aumenta ligeramente a altas temperaturas, pero permanece en el rango de $8-9 \times 10^{-6} K^{-1}$, que coincide bien con la matriz cerámica y reduce la tensión térmica. Sin embargo, la tenacidad a la fractura del $MoSi_2$ a altas temperaturas es baja ($2-3 MPa \cdot m^{1/2}$), y se generan microfisuras fácilmente debido a la tensión térmica cuando la temperatura sube y baja rápidamente, lo que afecta la estabilidad de las propiedades termodinámicas.

El funcionamiento a altas temperaturas también afecta la formación y estabilidad de la película protectora de SiO_2 . Por encima de $800^\circ C$, la densa película de SiO_2 protege eficazmente el sustrato, pero a temperaturas extremas cercanas a $1850^\circ C$, la volatilización del Si y del MoO_3 puede provocar un adelgazamiento de la película, reduciendo la estabilidad a largo plazo de las propiedades termodinámicas. En el rango de temperatura límite de $400-700^\circ C$, la generación de óxidos no protectores provoca la pulverización del material, lo que deteriora aún más la conductividad térmica y la resistencia al choque térmico. Para reducir los efectos adversos de la temperatura de operación, en aplicaciones prácticas, la estabilidad de las propiedades termodinámicas puede mejorarse optimizando las velocidades de calentamiento y enfriamiento, utilizando un tratamiento de preoxidación para formar la película inicial de SiO_2 y aplicando un recubrimiento protector (como Al_2O_3 o SiC). En cuanto al diseño de componentes,

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

el uso de estructuras tipo U o tipo W permite dispersar la tensión térmica y mejorar el rendimiento termodinámico a altas temperaturas.

2.11.2 Influencia de la atmósfera

La atmósfera tiene un efecto significativo en las propiedades termodinámicas de los elementos calefactores de MoSi_2 , principalmente al modificar el estado superficial y la estructura interna del material. En una atmósfera oxidante, la película protectora de SiO_2 generada sobre la superficie del MoSi_2 puede mantener eficazmente la estabilidad de las propiedades termodinámicas. El bajo coeficiente de difusión de oxígeno de la película de SiO_2 garantiza la consistencia a largo plazo de la conductividad térmica y el coeficiente de expansión térmica, a la vez que protege el sustrato de la corrosión por oxidación. Sin embargo, una atmósfera oxidante con alta humedad puede provocar la hidratación de la película de SiO_2 , formando una estructura de silicato laxa, lo que reduce la conductividad térmica y la resistencia al choque térmico. En una atmósfera reductora (como H_2) o en un entorno de vacío, la película de SiO_2 no se puede formar o se destruye, lo que provoca la volatilización del Si y la degradación del sustrato, una disminución significativa de la conductividad térmica y un aumento de la tensión térmica que puede inducir grietas, afectando gravemente las propiedades termodinámicas.

Las atmósferas inertes (como Ar, N_2) tienen poco efecto en las propiedades termodinámicas de MoSi_2 , pero la operación a largo plazo puede formar lentamente una película de SiO_2 debido a la presencia de trazas de oxígeno, cambiando ligeramente la conductividad térmica. Las impurezas en la atmósfera (como sulfuros y cloruros) pueden reaccionar con la superficie de MoSi_2 para formar compuestos no protectores, reduciendo la estabilidad de las propiedades termodinámicas. Para hacer frente a la influencia de la atmósfera, se debe preferir una atmósfera oxidante estable en aplicaciones prácticas para evitar ambientes de alta humedad o reductores. Los recubrimientos de superficie (como SiC o Al_2O_3) pueden mejorar la resistencia a la corrosión y mantener las propiedades termodinámicas. Además, la inspección regular de la pureza de la atmósfera y el estado de la superficie del componente, y la optimización de los parámetros de operación (como el control de la humedad de la atmósfera) son medidas efectivas para garantizar la estabilidad de las propiedades termodinámicas del elemento calefactor de MoSi_2 .

2.11.3 Efecto de la frecuencia de calentamiento/enfriamiento

tiene un impacto significativo en las propiedades termodinámicas de los elementos de calentamiento de disiliciuro de molibdeno (MoSi_2), especialmente en aplicaciones que requieren ciclos térmicos frecuentes, como hornos de sinterización de cerámica, hornos de recocido de vidrio y equipos de tratamiento térmico de metales. Las propiedades termodinámicas de MoSi_2 , incluyendo la conductividad térmica, el coeficiente de expansión térmica y la difusividad térmica, se ven desafiadas por el estrés térmico durante ciclos rápidos de calentamiento/enfriamiento. El ciclo térmico frecuente hace que los esfuerzos térmicos actúen repetidamente sobre la microestructura de MoSi_2 , lo que puede desencadenar el inicio y propagación de microfisuras, especialmente debido a su fragilidad a baja temperatura (tenacidad a la fractura de aproximadamente $2\text{-}3 \text{ MPa}\cdot\text{m}^{1/2}$), reduciendo la conductividad térmica y la

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

resistencia al choque térmico. Además, en el rango de temperatura de "plaga" de 400 a 700 °C, el ciclo térmico rápido puede agravar la formación de óxidos no protectores (una mezcla de MoO_3 y SiO_2), lo que provoca la formación de polvo en la superficie y un mayor deterioro de las propiedades termodinámicas.

El efecto de la frecuencia de calentamiento/enfriamiento está estrechamente relacionado con el rango de temperatura y la velocidad del ciclo. En ciclos a gran escala, desde alta temperatura (1200-1850 °C) hasta baja temperatura (temperatura ambiente o 400-700 °C), la tensión térmica es más significativa, lo que puede causar grietas o desprendimiento de la película protectora de SiO_2 , debilitando la resistencia a la oxidación y la conductividad térmica. Los ciclos de alta frecuencia (como calentar y enfriar varias veces por hora) acelerarán el daño por fatiga de la microestructura y acortarán la vida útil del componente, mientras que los ciclos de baja frecuencia (como una vez al día) tienen un efecto relativamente pequeño en las propiedades termodinámicas. La pureza y la microestructura del material son fundamentales para la tolerancia a los ciclos térmicos. El MoSi_2 de alta pureza puede reducir el debilitamiento del límite de grano causado por impurezas y reducir el riesgo de propagación de grietas. Las microestructuras densas (como las preparadas mediante prensado en caliente y sinterización) pueden dispersar eficazmente la tensión térmica y mejorar la resistencia a la fatiga térmica, mientras que las muestras con mayor porosidad son propensas al agrietamiento debido a la concentración de tensiones. La modificación con dopaje también puede mejorar el rendimiento del ciclo térmico. Por ejemplo, la adición de óxidos de tierras raras (como el Y_2O_3) puede mejorar la resistencia del borde de grano e inhibir la propagación de grietas. Para mitigar los efectos adversos de la frecuencia de calentamiento/enfriamiento, se pueden implementar diversas medidas de optimización en aplicaciones prácticas. El control de las velocidades de calentamiento y enfriamiento puede reducir la acumulación de tensión térmica y evitar el paso rápido a través del rango de temperatura de 400-700 °C, inhibiendo así la oxidación por plaga. Los recubrimientos superficiales (como Al_2O_3 o SiC) pueden mejorar la resistencia al choque térmico y la estabilidad de las películas de SiO_2 , prolongando la vida útil del ciclo térmico. La optimización del diseño de componentes (como el uso de estructuras en forma de U o de W) puede dispersar la tensión térmica y reducir la iniciación de grietas. La verificación periódica del estado de la superficie y el ajuste de los parámetros del ciclo térmico también pueden ampliar eficazmente la estabilidad de las propiedades termodinámicas del elemento de calentamiento MoSi_2 para satisfacer las necesidades de aplicaciones de ciclo térmico de alta frecuencia.

2.11.4 Influencia de la tensión de funcionamiento

El voltaje de operación es un factor externo clave que afecta el rendimiento termodinámico y la estabilidad operativa de los elementos calefactores de MoSi_2 , y está directamente relacionado con su eficiencia de calentamiento, distribución de temperatura y vida útil. La resistividad del MoSi_2 presenta un coeficiente de temperatura positivo, que es de aproximadamente $2,0 \times 10^{-5}$ a temperatura ambiente. $\Omega \cdot \text{cm}$, y aumenta a aproximadamente $4,0 \times 10^{-5}$ a 1000 °C $\Omega \cdot \text{cm}$, y a aproximadamente $4,5 \times 10^{-5}$ a 1500 °C $\Omega \cdot \text{cm}$. Esta propiedad permite que el MoSi_2 ajuste la potencia de salida de forma adaptativa a diferentes voltajes, pero puede afectar negativamente las propiedades termodinámicas en condiciones de alto voltaje o de voltaje inestable. El alto voltaje provoca un calentamiento rápido del componente y

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

genera una gran tensión térmica, especialmente en el MoSi_2 , que presenta una fragilidad significativa a baja temperatura, lo que puede inducir microfisuras y reducir la conductividad térmica y la resistencia al choque térmico. Además, el alto voltaje puede causar sobrecalentamiento local, acelerar la volatilización del Si o MoO_3 de la película protectora superficial de SiO_2 , adelgazar la película y reducir la resistencia a la oxidación.

Las fluctuaciones de voltaje también son un factor importante que afecta las propiedades termodinámicas. Las fluctuaciones frecuentes de voltaje pueden causar inestabilidad de corriente, lo que resulta en una distribución desigual de la temperatura dentro del componente, aumentando la concentración de tensión térmica y luego causando daño microestructural o grietas superficiales. La operación de alto voltaje a largo plazo puede acelerar el envejecimiento de MoSi_2 , como la deriva de resistividad o el crecimiento de grano, y reducir la difusividad térmica y la conductividad térmica. La pureza del material y la microestructura juegan un papel importante en la tolerancia a los efectos del voltaje. El MoSi_2 de alta pureza puede reducir la desigualdad de la resistencia local causada por impurezas y reducir el riesgo de sobrecalentamiento. Las microestructuras densas (como las preparadas por prensado en caliente y sinterización) pueden mejorar la capacidad de dispersar la tensión térmica y mejorar la resistencia a las fluctuaciones de voltaje. Las modificaciones de dopaje (como agregar W o Nb) pueden optimizar la resistividad y mejorar la estabilidad electrotérmica bajo voltaje, pero la resistencia a la oxidación necesita ser equilibrada.

Para mitigar los efectos adversos del voltaje utilizado, es necesario optimizar la estrategia de control de voltaje en aplicaciones prácticas. El uso de un sistema de suministro de energía estable y un regulador de voltaje puede reducir las fluctuaciones y garantizar un calentamiento uniforme. El diseño de adaptación de resistencias entre el extremo frío y el caliente (como dopar el extremo frío con un material altamente conductor) puede reducir el riesgo de sobrecalentamiento local y mejorar la eficiencia energética. La aplicación de un recubrimiento protector (como SiC o Al_2O_3) puede mejorar la resistencia a la oxidación superficial y la tolerancia a la tensión térmica, además de prolongar la vida útil del componente. Además, la monitorización regular del voltaje de entrada y del estado de la superficie del componente, combinada con un diseño adecuado de la curva de calentamiento (como un calentamiento lento), puede mantener eficazmente las propiedades termodinámicas del elemento calefactor de MoSi_2 y satisfacer las necesidades de aplicaciones de alta precisión como la sinterización de cerámica y el tratamiento térmico de semiconductores.

2.11.5 Efecto de la densidad de corriente

tiene una influencia importante en las propiedades termodinámicas y la estabilidad a largo plazo de los elementos calefactores de MoSi_2 , y determina directamente su potencia de calentamiento, distribución de la temperatura y comportamiento de envejecimiento del material. Como material calefactor resistivo, la potencia de salida de MoSi_2 es proporcional al cuadrado de la densidad de corriente ($P = I^2R$), por lo que una alta densidad de corriente aumentará significativamente la temperatura del elemento, lo que afectará la conductividad térmica, la expansión térmica y la resistencia al choque térmico. La conductividad térmica de MoSi_2 es menor a alta temperatura (aproximadamente $15 \text{ W}/(\text{m}\cdot\text{K})$ a 1500°C)

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

que a temperatura ambiente ($45 \text{ W}/(\text{m}\cdot\text{K})$). Una alta densidad de corriente puede causar un sobrecalentamiento local y generar una gran tensión térmica, especialmente en MoSi_2 con una fragilidad significativa a baja temperatura, que es fácil de causar microfisuras o agrietamiento de la película protectora superficial de SiO_2 , reduciendo las propiedades termodinámicas. Además, la alta densidad de corriente puede acelerar la volatilización de Si o MoO_3 de la película de SiO_2 , haciendo que la película sea más delgada y debilitando la resistencia a la oxidación, especialmente a temperaturas extremas cercanas a 1850°C . La uniformidad de la distribución de la densidad de corriente es crítica para el rendimiento termodinámico. La densidad de corriente no uniforme (como la alta densidad de corriente local causada por defectos de diseño de componentes o mal contacto) conducirá a mayores gradientes de temperatura, mayor estrés térmico y riesgos de grietas, y menor difusividad térmica. La operación de alta densidad de corriente a largo plazo puede causar deriva de resistividad o degradación microestructural de MoSi_2 (como crecimiento de grano o debilitamiento del límite de grano), afectando aún más la conductividad térmica y la resistencia al choque térmico. La pureza y la microestructura del material tienen un efecto significativo en la tolerancia de la densidad de corriente. El MoSi_2 de alta pureza puede reducir la irregularidad de la resistencia local causada por impurezas y reducir el riesgo de sobrecalentamiento. Las microestructuras densas (como la preparación por prensado en caliente y sinterización) pueden mejorar las capacidades de dispersión del estrés térmico y mejorar la resistencia al choque de densidad de corriente. La modificación por dopaje (como agregar Y_2O_3) puede optimizar la estructura del límite de grano, estabilizar la resistividad y mejorar las propiedades termodinámicas bajo densidad de corriente.

Para mitigar los efectos adversos de la densidad de corriente utilizada, es necesario optimizar el diseño del componente y las condiciones de operación en aplicaciones prácticas. Los componentes en forma de U o W con diseño de sección transversal uniforme pueden asegurar una distribución uniforme de la densidad de corriente y reducir el sobrecalentamiento local. La adaptación de la resistencia entre el extremo frío y el extremo caliente (como dopar el extremo frío con materiales altamente conductores) puede reducir la concentración de la densidad de corriente y mejorar la eficiencia energética. La aplicación de un recubrimiento protector (como Al_2O_3 o SiC) puede mejorar la resistencia a la oxidación de la superficie y la resistencia al estrés térmico, y extender la vida útil del componente. El uso de un controlador de corriente para estabilizar la corriente de entrada, evitar una densidad de corriente excesiva y verificar regularmente el estado de la superficie y las propiedades eléctricas del componente son medidas efectivas para mantener la estabilidad de las propiedades termodinámicas del elemento calefactor MoSi_2 . Estas estrategias de optimización pueden satisfacer las necesidades de aplicaciones de alta potencia, como la fusión de vidrio y el tratamiento térmico de metales.

2.11.6 Impacto del método de instalación

El H tiene una influencia importante en el rendimiento termodinámico y la vida útil de los elementos calefactores de disiliciuro de molibdeno (MoSi_2), lo cual está directamente relacionado con la distribución de la tensión térmica, la uniformidad de la temperatura y la estabilidad mecánica. Las propiedades termodinámicas del MoSi_2 , incluyendo la conductividad térmica, el coeficiente de expansión térmica y la difusividad térmica, pueden verse afectadas negativamente por la tensión térmica

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

o mecánica si se utilizan métodos de instalación inadecuados. Los métodos de instalación comunes incluyen la suspensión vertical, el soporte horizontal y la sujeción, cada uno de los cuales tiene diferentes efectos en las propiedades termodinámicas. La suspensión vertical es el método de instalación más común para los elementos calefactores de MoSi_2 y es adecuado para elementos en forma de U o de W.

Puede reducir las restricciones mecánicas y permitir la expansión térmica libre de los elementos a altas temperaturas, reduciendo así la tensión térmica. Sin embargo, si el punto de suspensión no está diseñado correctamente (como la concentración de tensión en el punto de contacto), puede causar grietas locales y reducir la conductividad térmica y la resistencia al choque térmico. La instalación de soporte horizontal se utiliza generalmente para elementos de tipo varilla recta, pero es necesario asegurar que el material de soporte (como alúmina de alta pureza) coincida con el coeficiente de expansión térmica de MoSi_2 , de lo contrario, la concentración de tensión puede ser causada por un desajuste de expansión térmica, afectando la difusividad térmica. El método de fijación de sujeción es más común en hornos pequeños, pero una fuerza de sujeción excesiva puede causar microfisuras en MoSi_2 debido a la fragilidad a baja temperatura, debilitando así las propiedades termodinámicas.

El método de instalación también afecta la estabilidad y la resistencia a la oxidación de la película protectora superficial de SiO_2 . Una tensión de instalación desigual puede provocar grietas en la capa superficial, especialmente en el rango de temperaturas límite de 400 a 700 °C. Las grietas pueden agravar la formación de óxidos no protectores, reducir la conductividad térmica y la resistencia al choque térmico. Además, el método de instalación tiene un efecto indirecto en la distribución de la corriente y la uniformidad de la temperatura. Por ejemplo, un contacto deficiente puede aumentar la densidad de corriente local, lo que provoca sobrecalentamiento y acelera la degradación de la película de SiO_2 . Para optimizar el impacto del método de instalación, se debe seleccionar un diseño que se adapte al tipo de horno en las aplicaciones reales, como el uso de soportes cerámicos de alta pureza para reducir la descompensación por expansión térmica y el uso de abrazaderas flexibles para reducir la tensión mecánica. Garantizar un buen contacto entre el punto de instalación y el extremo frío de MoSi_2 puede mejorar la uniformidad de la corriente y reducir el sobrecalentamiento local. La verificación periódica del desgaste y la holgura del punto de instalación, combinada con una velocidad de calentamiento y enfriamiento razonable (como 5-10 °C/min), puede mantener de manera efectiva las propiedades termodinámicas del elemento de calentamiento MoSi_2 y extender su vida útil en aplicaciones como sinterización de cerámica y fusión de vidrio.

2.11.7 Impacto de la calidad y pureza de los componentes

de MoSi_2 son los factores intrínsecos fundamentales que afectan a sus propiedades termodinámicas y determinan directamente su conductividad térmica, coeficiente de expansión térmica, resistencia al choque térmico y estabilidad a largo plazo. El MoSi_2 de alta pureza (la pureza suele ser $\geq 99,5\%$) puede mejorar significativamente las propiedades termodinámicas. Su conductividad térmica es de unos 45 $\text{W}/(\text{m}\cdot\text{K})$ a temperatura ambiente y de unos 15 $\text{W}/(\text{m}\cdot\text{K})$ a 1500 °C. Su coeficiente de difusión térmica es de unos $1,6 \times 10^{-5} \text{ m}^2/\text{s}$ a temperatura ambiente y de unos $0,8 \times 10^{-5} \text{ m}^2/\text{s}$ a 1500 °C. Los materiales de alta pureza pueden reducir la dispersión de fonones y el debilitamiento de los límites de grano

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

causados por impurezas (como Fe, Al y C), mejorando así la conductividad térmica y las capacidades de dispersión de la tensión térmica. La presencia de impurezas puede provocar heterogeneidad en la resistencia local, aumentar la concentración de tensiones térmicas, reducir la resistencia al choque térmico e incluso inducir microfisuras, especialmente en la etapa frágil de baja temperatura del MoSi_2 . Además, las impurezas pueden reaccionar con el oxígeno para formar óxidos no protectores, lo que debilita la densidad de la película protectora superficial de SiO_2 y reduce la estabilidad de la resistencia a la oxidación y las propiedades termodinámicas, especialmente en el rango de temperatura de "plaga" de 400-700 °C, donde las impurezas agravan la pulverización del material.

El MoSi_2 preparado mediante sinterización por prensado en caliente presenta una alta densidad (cerca de más del 98 % de la densidad teórica), baja porosidad y mejor conductividad térmica y resistencia al choque térmico que las muestras preparadas mediante sinterización reactiva o síntesis autopropagante de alta temperatura (SHS). Los componentes con alta porosidad presentan baja conductividad térmica debido a la dispersión de calor por los poros y la concentración de tensiones, y son propensos a agrietarse durante los ciclos térmicos, lo que reduce el coeficiente de difusión térmica.

de MoSi_2 de alta calidad también deben presentar una microestructura uniforme y un tamaño de grano moderado (generalmente de 10 a 50 μm). Un tamaño de grano excesivamente grande puede reducir la resistencia de los límites de grano, mientras que un tamaño de grano demasiado pequeño puede aumentar la dispersión de los límites de grano y reducir la conductividad térmica. La modificación mediante dopaje puede optimizar aún más la calidad y la pureza. Por ejemplo, la adición de óxidos de tierras raras (como el Y_2O_3) puede mejorar la unión de los límites de grano y la resistencia al choque térmico, mientras que los dopantes de alta pureza pueden evitar la introducción de impurezas adicionales.

Para mejorar la calidad y pureza de los componentes, se deben seleccionar materias primas de alta pureza (como polvos de Mo y Si de alta pureza) y el proceso de preparación debe controlarse estrictamente en aplicaciones prácticas. La sinterización por prensado en caliente o la pulverización de plasma pueden mejorar la densidad y reducir la porosidad y los defectos. Los enlaces de control de calidad (como la difracción de rayos X y la microscopía electrónica de barrido) pueden garantizar la pureza de los componentes y la uniformidad de la microestructura. La aplicación de recubrimientos protectores (como SiC o Al_2O_3) puede compensar aún más la falta de resistencia a la oxidación de los materiales de baja pureza. La inspección regular del estado de la superficie y el rendimiento de los componentes, combinada con condiciones de funcionamiento estables (como evitar la humedad alta o la atmósfera reductora), puede maximizar las propiedades termodinámicas de los elementos calefactores de MoSi_2 para satisfacer las necesidades de aplicaciones de alta demanda como el tratamiento térmico de semiconductores y el tratamiento térmico de metales.

2.11.8 Efecto del tratamiento de protección del recubrimiento

El tratamiento de protección del recubrimiento influye significativamente en las propiedades termodinámicas de los elementos calefactores de MoSi_2 y puede mejorar significativamente su resistencia a la oxidación, la resistencia al choque térmico y la estabilidad de la conductividad térmica.

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

Los recubrimientos protectores más comunes incluyen recubrimientos de óxido (como Al_2O_3 , ZrO_2), recubrimientos de carburo (como SiC) y recubrimientos compuestos (como $\text{Al}_2\text{O}_3 - \text{SiC}$), que forman una capa protectora densa para compensar la deficiencia de la película de SiO_2 en la superficie de MoSi_2 en condiciones extremas. El recubrimiento de Al_2O_3 puede mejorar eficazmente la resistencia a la oxidación y mantener la estabilidad de la conductividad térmica (aproximadamente $15 \text{ W}/(\text{m}\cdot\text{K})$) a 1500°C) debido a su alto punto de fusión (aproximadamente 2050°C) y bajo coeficiente de difusión de oxígeno (aproximadamente $10^{-14} \text{ cm}^2/\text{s}$ a 1500°C), especialmente en atmósferas oxidantes de alta temperatura ($1200\text{-}1850^\circ\text{C}$).

de SiC presenta una mejor correspondencia entre el coeficiente de expansión térmica (aproximadamente $4,5 \times 10^{-6} \text{ K}^{-1}$) y el de MoSi_2 (aproximadamente $8,1 \times 10^{-6} \text{ K}^{-1}$), lo que reduce el desajuste de la tensión térmica y mejora la resistencia al choque térmico, haciéndolo adecuado para entornos con ciclos térmicos elevados, como los hornos de sinterización de cerámica. Los recubrimientos compuestos combinan las ventajas de múltiples materiales. Por ejemplo, los recubrimientos de $\text{Al}_2\text{O}_3 - \text{SiC}$ presentan una alta resistencia a la oxidación y al choque térmico, lo que mejora significativamente la estabilidad a largo plazo de las propiedades termodinámicas.

La mejora de las propiedades termodinámicas mediante recubrimientos está estrechamente relacionada con su adhesión, espesor y uniformidad. Los recubrimientos de alta calidad (como los preparados mediante deposición química en fase de vapor (CVD)) tienen alta adhesión y uniformidad, pueden dispersar eficazmente la tensión térmica y mantener la estabilidad del coeficiente de difusión térmica (aproximadamente $0,8 \times 10^{-5} \text{ m}^2/\text{s}$ a 1500°C). Los recubrimientos demasiado gruesos ($>100 \mu\text{m}$) pueden causar agrietamiento debido al desajuste de expansión térmica y reducir la conductividad térmica, mientras que los recubrimientos demasiado delgados ($<10 \mu\text{m}$) pueden no proporcionar la protección adecuada. El proceso de recubrimiento también tiene un impacto significativo en las propiedades termodinámicas. La pulverización de plasma puede formar recubrimientos gruesos y densos, que son adecuados para aplicaciones a escala industrial, pero pueden tener microporos y reducir ligeramente la conductividad térmica; los recubrimientos delgados generados por procesos de CVD son más uniformes, tienen baja tensión térmica y son adecuados para requisitos de alta precisión. Los recubrimientos también pueden reducir el impacto de la oxidación por plaga ($400\text{-}700^\circ\text{C}$). Por ejemplo, los recubrimientos de SiC pueden inhibir la formación de MoO_3 no protector y proteger las propiedades termodinámicas.

La estabilidad a largo plazo del recubrimiento se ve afectada por el entorno de trabajo. En un entorno de alta humedad, el recubrimiento de Al_2O_3 puede sufrir una reacción de hidratación, lo que reduce la conductividad térmica; en un entorno reductor o de vacío, el recubrimiento puede deteriorarse debido a la volatilización del silicio, lo que afecta al coeficiente de difusión térmica. Para optimizar el impacto del tratamiento de protección del recubrimiento, es necesario seleccionar el tipo y el proceso de recubrimiento adecuados según los requisitos de la aplicación. Por ejemplo, los recubrimientos de CVD de alta pureza son los preferidos para hornos de tratamiento térmico de semiconductores, y los recubrimientos de SiC gruesos se pueden utilizar para hornos de fusión de vidrio. El diseño de la interfaz (como la adición de una capa de transición de SiC) puede mejorar la adhesión y reducir el riesgo de desprendimiento. La inspección regular de la integridad del recubrimiento y el estado de la superficie,

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

junto con una atmósfera oxidante estable y velocidades de calentamiento y enfriamiento adecuadas (como 5-10 °C/min), puede maximizar el efecto protector del recubrimiento sobre las propiedades termodinámicas del elemento calefactor de MoSi₂ y prolongar su vida útil en aplicaciones de alta temperatura.

2.12 CTIA GROUP LTD Ficha de datos de seguridad del elemento calefactor MoSi₂

Proporciona información sobre el uso, almacenamiento y manipulación seguros de los elementos calefactores de disiliciuro de molibdeno (MoSi₂) fabricados por CTIA GROUP LTD. El MoSi₂ es un compuesto intermetálico con excelente resistencia a la oxidación a alta temperatura y conductividad eléctrica. Se utiliza ampliamente en hornos industriales y de laboratorio de alta temperatura (como sinterización de cerámica, fusión de vidrio y tratamiento térmico de metales). A continuación, se detalla el contenido de la MSDS de los elementos calefactores de MoSi₂ de CTIA GROUP LTD , basándose en las características de los materiales de MoSi₂ y las normas del sector, incluyendo sus propiedades físicas y químicas, identificación de peligros, funcionamiento seguro y medidas de emergencia.

Identificación y composición del material: Los elementos calefactores de MoSi₂ de CTIA GROUP LTD están compuestos principalmente de disiliciuro de molibdeno (fórmula química: MoSi₂ , número CAS: 12136-78-6), con una pureza generalmente $\geq 99,5$ % y pueden contener trazas de aditivos (como óxidos de tierras raras u óxido de aluminio) para mejorar su rendimiento. El MoSi₂ es un material cerámico con aspecto metálico grisáceo, estructura cristalina tetragonal de tipo α (tipo C11b), densidad aproximada de 6,24 g/cm³, punto de fusión aproximado de 2030 °C y conductividad eléctrica. El elemento calefactor suele tener forma de U, de W o una varilla recta, y se forma una densa película protectora de SiO₂ sobre la superficie bajo una atmósfera oxidante de alta temperatura. Las posibles impurezas incluyen Fe, Al, C, etc., y el contenido suele ser inferior al 0,1%, dependiendo del lote de producción y del proceso de dopaje.

Identificación de peligros : Los elementos calefactores de MoSi₂ son relativamente seguros en condiciones normales de uso a altas temperaturas, pero pueden existir los siguientes riesgos en ciertas condiciones. En cuanto a los riesgos físicos, el MoSi₂ es frágil a temperatura ambiente y puede romperse fácilmente debido a impactos mecánicos o manipulación inadecuada, lo que resulta en fragmentos afilados que pueden causar cortes. En cuanto a los riesgos químicos, el MoSi₂ sufre oxidación a baja temperatura, en el rango de temperatura de "plaga" de 400 a 700 °C, generando una mezcla de MoO₃ y SiO₂ , que puede liberar trazas de vapor de MoO₃ (que pueden irritar las vías respiratorias y los ojos). En un entorno reductor o de vacío, la volatilización del silicio puede causar la degradación del material y liberar vapor de silicio, cuya inhalación debe evitarse. En cuanto a los riesgos ambientales, el MoSi₂ en sí mismo tiene poco impacto en el medio ambiente, pero los componentes desechados deben tratarse como residuos peligrosos para evitar la contaminación.

Operación segura y medidas de protección: Para garantizar el uso seguro de los elementos calefactores de MoSi₂ de CTIA GROUP LTD , la hoja de datos de seguridad (MSDS) proporciona las siguientes instrucciones de funcionamiento. Use guantes protectores (como guantes resistentes a altas temperaturas)

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

y gafas protectoras durante la manipulación, evite el contacto directo con bordes afilados y evite que daños mecánicos o residuos lesionen a las personas. Se deben utilizar métodos de fijación adecuados durante la instalación (como suspensión vertical o abrazaderas flexibles) para evitar que la tensión mecánica excesiva provoque roturas. Al utilizarlos, asegúrese de que el sistema de alimentación sea de control proporcional, con disparo de fase y con función de limitación de corriente para evitar que las conmutaciones no proporcionales o los métodos de alimentación repentinos dañen los componentes. Al almacenarlos, colóquelos en un entorno seco y sin gases corrosivos para evitar la corrosión superficial causada por la humedad o una atmósfera ácida.

Almacenamiento y transporte: Los elementos calefactores de MoSi_2 deben almacenarse en un ambiente seco y limpio, con una temperatura controlada de 5-35 °C y una humedad relativa inferior al 70 %. Evite el contacto con sustancias ácidas o ambientes con alta humedad para prevenir la corrosión superficial o la degradación de la película de SiO_2 . Utilice cajas de espuma o madera para el transporte y fije los componentes para evitar roturas por vibraciones o impactos. El embalaje debe estar marcado con los símbolos de "frágil" y "a prueba de humedad", y debe adjuntarse una hoja de datos de seguridad (MSDS) como referencia. Durante el transporte, se deben cumplir las normas de transporte de mercancías peligrosas (como la UN3077, sustancias peligrosas para el medio ambiente) para garantizar una llegada segura.



CTIA GROUP LTD Varilla de molibdeno de silicio

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

Capítulo 3 Estructura y diseño de elementos calefactores de MoSi₂

3.1 Estructuras comunes de los elementos calefactores de MoSi₂

de disiliciuro de molibdeno (MoSi₂) se utilizan ampliamente en hornos industriales de alta temperatura y equipos de laboratorio debido a su excelente resistencia a la oxidación a alta temperatura, conductividad eléctrica y temperatura máxima de funcionamiento. El diseño estructural afecta directamente la eficiencia de calentamiento, la uniformidad de la temperatura, la resistencia al choque térmico y la vida útil. Las estructuras comunes de los elementos calefactores de MoSi₂ incluyen el tipo U, el tipo W, el tipo L, el tipo de varilla recta y formas personalizadas, entre las cuales el tipo U y el tipo W son los más populares debido a su eficiente distribución del calor y métodos de instalación flexibles. Estas estructuras generalmente constan de un extremo caliente (parte generadora de calor) y un extremo frío (parte de conexión). El extremo caliente genera calor a alta temperatura y el extremo frío reduce la resistencia mediante el dopaje con materiales altamente conductores (como aluminio o tungsteno) para garantizar la estabilidad de la conexión con la fuente de alimentación. El diseño estructural de los elementos MoSi₂ debe considerar exhaustivamente el tamaño del horno, la potencia de calentamiento, la frecuencia del ciclo térmico y el método de instalación para satisfacer las necesidades de diferentes aplicaciones, como la sinterización de cerámica, la fusión de vidrio y el tratamiento térmico de metales.

La optimización del diseño estructural es crucial para el rendimiento de los elementos calefactores de MoSi₂ . La longitud, las dimensiones de la sección transversal y el método de conexión de los extremos caliente y frío deben coincidir con precisión para garantizar una distribución uniforme de la corriente y evitar el sobrecalentamiento local. El diámetro del extremo caliente suele ser de 6 a 12 mm, y el del extremo frío es de 1,5 a 2 veces mayor que el del extremo caliente para reducir la temperatura del extremo frío y prolongar la vida útil. La forma geométrica del elemento (como el radio de curvatura del tipo U o W) afecta la distribución de la tensión térmica. Un diseño de curvatura razonable puede reducir el riesgo de grietas por choque térmico. La pureza del material (generalmente $\geq 99,5\%$) y el proceso de preparación (como el prensado en caliente y la sinterización) tienen un impacto significativo en la integridad estructural. Un MoSi₂ de alta pureza y densidad puede reducir los microdefectos y mejorar la resistencia a la fatiga térmica. El tratamiento superficial (como el pulido o el recubrimiento) también puede mejorar la resistencia a la oxidación y las propiedades termodinámicas. En aplicaciones prácticas, la selección estructural debe adaptarse al espacio del horno, los requisitos de distribución de temperatura y las limitaciones de instalación. Por ejemplo, el tipo U es adecuado para hornos pequeños y el tipo W para hornos grandes, ya que proporciona un calentamiento más uniforme.

3.1.1 Elemento calefactor MoSi₂ en forma de U

MoSi₂ en forma de U son una de las estructuras más comunes y se utilizan ampliamente en hornos de alta temperatura de tamaño pequeño a mediano, como hornos de laboratorio y hornos de sinterización de cerámica, gracias a su diseño simple y compacto, y a su eficiente rendimiento de calentamiento. La estructura del elemento en forma de U consta de dos extremos calientes paralelos conectados por una curva en forma de U, y el extremo frío se ubica en la parte superior del extremo caliente y se conecta a

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

la fuente de alimentación. La principal ventaja del diseño en forma de U es que su extremo caliente proporciona una zona concentrada de alta temperatura, ideal para aplicaciones que requieren una alta densidad térmica local, como la sinterización en atmósfera oxidante con una temperatura máxima de hasta 1800 °C. La longitud del extremo caliente del elemento en forma de U suele ser de 100 a 500 mm, y la longitud específica se adapta al tamaño del horno y a los requisitos de potencia. El diámetro del extremo caliente es de 6 a 9 mm y el del extremo frío, de 12 a 18 mm, para garantizar una baja resistencia y una transmisión de corriente eficiente.

El rendimiento termodinámico del elemento en forma de U se beneficia de su geometría compacta. La distancia entre los extremos calientes (generalmente de 20 a 50 mm) optimiza la uniformidad de la temperatura y reduce la concentración de tensiones térmicas. El radio de curvatura de la estructura en forma de U debe diseñarse con precisión. Un radio demasiado pequeño puede causar concentración de tensiones y aumentar el riesgo de grietas por choque térmico, mientras que un radio demasiado grande puede reducir la eficiencia de calentamiento. La resistividad con coeficiente de temperatura positivo del MoSi₂ (aproximadamente $2,0 \times 10^{-5}$ a temperatura ambiente) $\Omega \cdot \text{cm}$, aproximadamente $4,5 \times 10^{-5}$ a 1500 °C $\Omega \cdot \text{cm}$) permite que el elemento en forma de U ajuste automáticamente la potencia a altas temperaturas, lo que lo hace adecuado para aplicaciones de control preciso de temperatura. Sin embargo, los elementos en forma de U pueden producir microfisuras debido a la acumulación de tensión en la conexión entre el extremo caliente y el extremo frío durante ciclos térmicos frecuentes, especialmente en MoSi₂, que presenta una fragilidad significativa a baja temperatura (la tenacidad a la fractura es de aproximadamente 2-3 MPa·m^{1/2}). Para mejorar la resistencia al choque térmico y la vida útil de los elementos en forma de U, los procesos de prensado en caliente y sinterización pueden aumentar la densidad del material, y los recubrimientos superficiales (como SiC o Al₂O₃) pueden mejorar la resistencia a la oxidación y a la fatiga térmica.

En cuanto a la instalación, los elementos en forma de U suelen suspenderse verticalmente, y el extremo frío se fija mediante una abrazadera cerámica para reducir la tensión mecánica. Durante la instalación, es necesario asegurar que el extremo frío esté en buen contacto con la fuente de alimentación para evitar el sobrecalentamiento local. En la práctica, los elementos en forma de U deben evitar superar rápidamente el rango de temperatura límite de 400-700 °C para evitar la generación de óxidos no protectores (una mezcla de MoO₃ y SiO₂) que causan la formación de polvo en la superficie. El mantenimiento de los elementos en forma de U incluye la inspección regular de la integridad de las curvas y los puntos de conexión, y la supervisión del estado de la película protectora de SiO₂ para garantizar su estabilidad a largo plazo en una atmósfera oxidante.

3.1.2 Elemento calefactor MoSi₂ tipo W

MoSi₂ tipo W se utilizan ampliamente en hornos de alta temperatura de gran tamaño o en entornos que requieren campos de temperatura uniformes, como hornos de fusión de vidrio, hornos industriales de sinterización de cerámica y equipos de tratamiento térmico de metales, gracias a su compleja geometría y mayor área de calentamiento. La estructura del elemento tipo W consta de múltiples extremos calientes paralelos conectados por curvas continuas en forma de W, generalmente con tres o más extremos

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

calientes, y los extremos fríos se ubican a ambos lados o en la parte superior y se conectan a la fuente de alimentación. Su principal ventaja es que puede cubrir una mayor área del horno y proporcionar una distribución de temperatura más uniforme, lo cual es adecuado para hornos grandes o necesidades de calentamiento multizona. La longitud del extremo caliente del elemento tipo W suele ser de 200 a 1000 mm, el diámetro de 6 a 12 mm y el diámetro del extremo frío de 12 a 24 mm. El tamaño específico se personaliza según la demanda de energía y el diseño del horno. La densidad de potencia de calentamiento suele ser de 15 a 20 W/cm² (a 1700 °C), lo que puede satisfacer los requisitos de alta potencia de salida manteniendo la uniformidad de la temperatura.

El rendimiento termodinámico del elemento tipo W se beneficia de su diseño de múltiples extremos calientes. La separación entre los múltiples extremos calientes (generalmente de 30 a 60 mm) puede optimizar la distribución de la radiación térmica y reducir el sobrecalentamiento local y la concentración de tensiones térmicas. El radio de curvatura de la estructura tipo W debe controlarse con precisión. Un radio demasiado pequeño puede provocar concentración de tensiones y aumentar el riesgo de agrietamiento por choque térmico, mientras que un radio demasiado grande puede reducir la eficiencia de calentamiento. La resistividad del coeficiente de temperatura positivo (PTC) del MoSi₂ permite que el elemento tipo W ajuste adaptativamente la potencia a altas temperaturas para garantizar un control preciso de la temperatura y la estabilidad. Sin embargo, el elemento tipo W puede producir microfisuras debido a la acumulación de tensiones en múltiples curvas y puntos de conexión de extremos calientes y fríos durante ciclos térmicos frecuentes, especialmente cuando la fragilidad a baja temperatura del MoSi₂ es significativa (la tenacidad a la fractura es de aproximadamente 2-3 MPa·m^{1/2}). El proceso de sinterización por prensado en caliente puede aumentar la densidad del material (casi más del 98 % de la densidad teórica), reducir los microdefectos y mejorar la resistencia a la fatiga térmica. Los recubrimientos superficiales (como SiC o Al₂O₃) pueden mejorar aún más la resistencia a la oxidación y al choque térmico, prolongando así la vida útil de los componentes en atmósferas oxidantes de alta temperatura (hasta 1800-1850 °C).

En cuanto a la instalación, los componentes tipo W suelen suspenderse verticalmente o apoyarse horizontalmente, con el extremo frío fijado mediante una abrazadera o soporte cerámico de alta pureza para reducir la tensión mecánica y permitir la expansión térmica. Durante la instalación, es necesario asegurar que el extremo frío esté en buen contacto con la fuente de alimentación para evitar el sobrecalentamiento local causado por la resistencia de contacto. La forma compleja del componente tipo W requiere una mayor precisión de instalación, por ejemplo, asegurando que cada extremo caliente esté dispuesto simétricamente para mantener una distribución uniforme de la corriente. En aplicaciones prácticas, es necesario evitar pasar rápidamente por el rango de temperatura límite de 400-700 °C para prevenir la formación de óxidos no protectores (una mezcla de MoO₃ y SiO₂) que causan la formación de polvo superficial. El mantenimiento de los componentes tipo W requiere la inspección regular de la integridad de las curvas, los puntos de conexión y la película protectora superficial de SiO₂ para garantizar su estabilidad a largo plazo en una atmósfera oxidante. El mantenimiento de los componentes de tipo W también incluye el monitoreo de la temperatura del extremo frío (generalmente mantenida por debajo de 400 °C) para evitar que el sobrecalentamiento provoque la degradación de los puntos de conexión.

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

Para optimizar el rendimiento de los elementos tipo W, es posible cumplir con los requisitos de distribución de temperatura de un tipo de horno específico aumentando el número de extremos calientes o ajustando su espaciado durante el diseño. Por ejemplo, en un gran horno de fundición de vidrio, se puede utilizar un elemento tipo W con múltiples extremos calientes para lograr un calentamiento uniforme en una amplia área. El pulido o recubrimiento de la superficie puede reducir los defectos superficiales y mejorar la resistencia al choque térmico y a la oxidación. En la práctica, la instalación de los elementos tipo W debe tener en cuenta la dinámica del flujo de calor del horno, y los elementos deben disponerse de forma razonable para evitar la concentración o la falta de calor. La limpieza regular del interior del horno para evitar que las impurezas contaminen la superficie del elemento también es una medida importante para prolongar la vida útil del elemento tipo W. La compleja estructura del elemento tipo W le confiere una ventaja significativa en su uso en grandes hornos industriales, pero también impone mayores requisitos de precisión de fabricación y tecnología de instalación.

3.1.3 Elemento calefactor espiral MoSi₂

El elemento calefactor espiral de MoSi₂ presenta una estructura especial, ideal para aplicaciones que requieren alta densidad térmica y un área de calentamiento compacta, como pequeños hornos tubulares de laboratorio, equipos de análisis térmico u hornos industriales específicos. La estructura del elemento espiral consiste en una varilla de MoSi₂ enrollada en un extremo caliente espiral, y el extremo frío se ubica en ambos extremos de la espiral para la conexión a la fuente de alimentación. Su principal ventaja es que puede proporcionar alta potencia térmica en un espacio limitado. La forma espiral aumenta la superficie del extremo caliente y mejora la eficiencia de la radiación térmica, lo cual es ideal para aplicaciones que requieren un calentamiento rápido y un control preciso de la temperatura. El diámetro del extremo caliente del elemento espiral suele ser de 4 a 9 mm, y el número de espiras y el paso de la espiral (generalmente de 5 a 20 mm) se diseñan según el tamaño del horno y los requisitos de potencia. El diámetro del extremo frío es de 8 a 18 mm para garantizar una baja resistencia y una transmisión de corriente eficiente. La densidad de potencia de calefacción puede alcanzar los 20-25 W/cm² (a 1700 °C), que es más alta que la del tipo U y el tipo W, y es adecuada para escenarios de calefacción local de alta temperatura.

El rendimiento termodinámico de los elementos espirales se debe a su gran área superficial y diseño compacto. La estructura espiral proporciona una radiación térmica uniforme y reduce los gradientes de temperatura, lo que resulta adecuado para las necesidades de calentamiento cilíndrico en hornos tubulares. Sin embargo, la compleja geometría de la espiral dificulta su fabricación. La curvatura y el paso de la espiral requieren un control preciso. Una espiral demasiado cerrada puede provocar la concentración de tensiones térmicas y aumentar el riesgo de grietas, especialmente en la etapa frágil de baja temperatura del MoSi₂ (la tenacidad a la fractura es de aproximadamente 2-3 MPa·m^{1/2}). La resistividad con coeficiente de temperatura positivo del MoSi₂ permite que los elementos espirales ajusten la potencia de forma adaptativa a altas temperaturas para garantizar la precisión del control de temperatura. Para mejorar la resistencia al choque térmico y la vida útil, el proceso de sinterización por prensado en caliente puede aumentar la densidad del material (cerca de más del 98 % de la densidad teórica) y reducir los microdefectos. Los recubrimientos de superficie (como SiC o Al₂O₃, con coeficientes de expansión

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

térmica de aproximadamente $4,5 \times 10^{-6} \text{K}^{-1}$ y $8 \times 10^{-6} \text{K}^{-1}$, respectivamente) pueden mejorar la resistencia a la oxidación y la resistencia a la fatiga térmica, lo que extiende la vida útil de los componentes en atmósferas oxidantes de alta temperatura (hasta 1800°C).

En cuanto a la instalación, los elementos espirales suelen fijarse horizontal o verticalmente, y el extremo frío se fija mediante un soporte cerámico de alta pureza. Es necesario garantizar que la parte espiral no esté sujeta mecánicamente para permitir la expansión térmica. Se debe prestar especial atención a la uniformidad de la estructura espiral durante la instalación para evitar deformaciones o grietas causadas por la tensión de instalación. En aplicaciones prácticas, es necesario superar rápidamente el rango de temperatura límite de $400\text{-}700^\circ \text{C}$ para evitar la generación de óxidos no protectores (una mezcla de MoO_3 y SiO_2) y la formación de polvo superficial. El mantenimiento de los elementos espirales requiere la inspección regular del paso de la espiral, los puntos de conexión del extremo frío y la integridad de la película protectora superficial de SiO_2 para garantizar su estabilidad en una atmósfera oxidante. Debido al alto coste de fabricación de los elementos espirales y a los estrictos requisitos de precisión de instalación, su aplicación se centra principalmente en equipos de laboratorio de alta precisión u hornos industriales especiales.

3.1.4 Elemento calefactor MoSi_2 tipo varilla recta

El elemento calefactor de varilla recta MoSi_2 presenta una estructura lineal simple, ideal para hornos que requieren calentamiento lineal a larga distancia, como hornos de túnel, hornos de tratamiento térmico continuo o algunos hornos industriales de gran tamaño. Su estructura consta de un extremo caliente recto y un extremo frío, ubicado en ambos extremos o en uno de ellos, para la conexión a la fuente de alimentación. Sus principales ventajas son su simplicidad, bajo coste de fabricación, fácil producción e instalación a gran escala y su idoneidad para cubrir áreas de calentamiento a larga distancia. La longitud del extremo caliente del elemento de varilla recta suele ser de $300\text{-}2000 \text{ mm}$, su diámetro de $6\text{-}12 \text{ mm}$ y su diámetro del extremo frío de $12\text{-}24 \text{ mm}$. El tamaño específico se personaliza según la longitud del horno y los requisitos de potencia. La densidad de potencia de calentamiento suele ser de $15\text{-}18 \text{ W/cm}^2$ (a 1700°C), lo que resulta adecuado para aplicaciones de calentamiento uniforme con densidad de potencia media y baja.

El rendimiento termodinámico de los elementos de varilla recta está limitado por su diseño lineal. La distribución de temperatura a lo largo del extremo caliente puede no ser tan uniforme como la de los elementos de tipo U o tipo W. Especialmente al calentar a larga distancia, puede producirse el fenómeno de alta temperatura en el centro y baja temperatura en ambos extremos. Para mejorar la uniformidad de la temperatura, se puede optimizar la distribución de la resistencia ajustando el diámetro del extremo caliente o dopando segmentos. La resistividad del coeficiente de temperatura positivo de MoSi_2 (aproximadamente $2,0 \times 10^{-5}$ a temperatura ambiente) $\Omega \cdot \text{cm}$, aproximadamente $4,5 \times 10^{-5}$ a 1500°C $\Omega \cdot \text{cm}$) permite que los componentes de tipo varilla recta ajusten adaptativamente la potencia a altas temperaturas, pero su estructura lineal puede producir microfisuras debido a la concentración de tensión en ambos extremos del extremo caliente durante ciclos térmicos frecuentes, especialmente cuando la fragilidad a baja temperatura de MoSi_2 es significativa (la tenacidad a la fractura es de aproximadamente

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

2-3 MPa·m^{1/2}). El proceso de sinterización por prensado en caliente puede aumentar la densidad del material, reducir los microdefectos y mejorar la resistencia al choque térmico y la resistencia a la fatiga térmica. Los recubrimientos de superficie (como SiC o Al₂O₃) pueden mejorar aún más la resistencia a la oxidación y la estabilidad de la superficie, lo que extiende la vida útil de los componentes en atmósferas oxidantes de alta temperatura (hasta 1800 °C).

En cuanto a la instalación, los elementos de varilla recta suelen apoyarse horizontalmente o suspenderse verticalmente, y el extremo frío se fija mediante una abrazadera de cerámica de alta pureza. Es necesario asegurar una distribución uniforme de los puntos de apoyo para evitar el pandeo o la rotura del elemento. Durante la instalación, se debe prestar especial atención a la calidad del contacto entre el extremo frío y la fuente de alimentación para evitar el sobrecalentamiento local causado por la resistencia de contacto. En la práctica, es necesario superar rápidamente el rango de temperatura límite de 400-700 °C para evitar la generación de óxidos no protectores y la formación de polvo superficial. Para el mantenimiento de los elementos de varilla recta, es necesario comprobar periódicamente la integridad de la superficie del extremo caliente, el punto de conexión del extremo frío y la película protectora de SiO₂, y supervisar la temperatura del extremo frío (normalmente se mantiene por debajo de 400 °C) para evitar el sobrecalentamiento y la degradación. Debido a la estructura simple de los elementos tipo varilla recta, sus costos de fabricación y mantenimiento son bajos, pero los requisitos de uniformidad de temperatura son altos y el diseño debe optimizarse en combinación con el diseño del horno.

3.1.5 Comparación de diseños estructurales en forma de U, en forma de W y rectos

MoSi₂ en forma de U, W y varilla recta son las estructuras más comunes entre los elementos calefactores de MoSi₂, cada uno con sus propias características, adecuados para diferentes tipos de hornos y escenarios de aplicación. Los elementos en forma de U se caracterizan por su diseño compacto y capacidad de calentamiento centralizado. La longitud del extremo caliente suele ser de 100 a 500 mm, el diámetro de 6 a 9 mm y la densidad de potencia puede alcanzar los 20 W/cm² (a 1700 °C). Son adecuados para hornos pequeños y medianos (como hornos de caja de laboratorio y hornos de sinterización de cerámica) que requieren una alta densidad térmica local. Sus ventajas son la estructura simple, la fácil instalación y la alta eficiencia térmica; sin embargo, el extremo caliente cubre un área pequeña y la uniformidad de la temperatura está limitada por la separación entre los extremos calientes (generalmente de 20 a 50 mm). Es probable que se produzcan microfisuras en la conexión entre el extremo caliente y el extremo frío durante ciclos térmicos frecuentes. Los elementos en forma de W proporcionan un área de calentamiento más amplia con un diseño de múltiples extremos calientes. La longitud del extremo caliente es de 200-1000 mm, el diámetro es de 6-12 mm y la densidad de potencia es de 15-20 W/cm². Son adecuados para hornos grandes (como hornos de fusión de vidrio y hornos industriales de sinterización de cerámica) que requieren un campo de temperatura uniforme. Sus ventajas son una distribución de temperatura más uniforme y una fuerte resistencia a la tensión térmica, pero es complejo de fabricar, costoso y las múltiples curvas aumentan el riesgo de grietas por choque térmico. Los elementos de tipo varilla recta son conocidos por su estructura lineal, con una longitud de extremo caliente de 300-2000 mm, un diámetro de 6-12 mm y una densidad de potencia de 15-18 W/cm², que es adecuada para hornos de túnel u hornos de tratamiento térmico continuo con calentamiento lineal de

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

larga distancia. Sus ventajas son el bajo coste de fabricación y la instalación sencilla, pero la uniformidad de la temperatura es deficiente y las grietas se generan fácilmente en ambos extremos del extremo caliente debido a la concentración de tensiones.

Desde la perspectiva de las propiedades termodinámicas, la conductividad térmica (aproximadamente $45 \text{ W}/(\text{m}\cdot\text{K})$ a temperatura ambiente y aproximadamente $15 \text{ W}/(\text{m}\cdot\text{K})$ a $1500 \text{ }^\circ\text{C}$) y el coeficiente de expansión térmica (aproximadamente $8,1 \times 10^{-6} \text{ K}^{-1}$) de las tres estructuras son similares, pero la forma geométrica afecta la distribución de la tensión térmica. El diseño de flexión del tipo U y el tipo W puede dispersar la tensión térmica, y la resistencia al choque térmico es mejor que la del tipo de varilla recta, pero el tipo de varilla recta tiene una mayor estabilidad mecánica debido a la falta de puntos de concentración de tensión de flexión durante el calentamiento a larga distancia.

En términos de resistencia a la oxidación, las tres estructuras se basan en la película protectora superficial de SiO_2 (el coeficiente de difusión de oxígeno es de aproximadamente $10^{-13} \text{ cm}^2/\text{s}$ a 1500°C), pero el tipo W tiene un área superficial mayor, y la formación y el mantenimiento de la película de SiO_2 son más uniformes, y la resistencia a la oxidación es ligeramente mejor. El tipo de varilla recta puede causar degradación local de la película de SiO_2 debido a la temperatura desigual durante el calentamiento a larga distancia. En términos de rendimiento del ciclo térmico, el tipo U y el tipo W son propensos a microfisuras en ciclos térmicos frecuentes debido a su geometría compleja, mientras que el tipo de varilla recta es más resistente a la fatiga térmica debido a su estructura simple, pero la distribución de la temperatura necesita ser optimizada.

En cuanto a la instalación y el mantenimiento, los elementos en forma de U son adecuados para la suspensión vertical y su instalación es sencilla, pero se debe prestar atención al contacto del extremo frío; los elementos en forma de W requieren una instalación precisa y simétrica, y su mantenimiento es complejo, pero son adecuados para hornos grandes; las varillas rectas son flexibles de instalar, pero requieren un soporte uniforme para evitar deformaciones. El proceso de fabricación tiene efectos similares en las tres estructuras. El prensado en caliente y la sinterización pueden mejorar la densidad (cerca del 98%), y los recubrimientos superficiales (como SiC o Al_2O_3) pueden mejorar la resistencia a la oxidación y al choque térmico. Al elegir, el tipo U es adecuado para hornos pequeños de alta precisión, el tipo W para hornos grandes de calentamiento uniforme y el tipo de varilla recta para el calentamiento lineal a larga distancia. Debe considerarse exhaustivamente según el diseño del horno, los requisitos de potencia y la frecuencia del ciclo térmico.

3.2 Diseño dimensional de elementos calefactores de MoSi_2

de disiliciuro de molibdeno (MoSi_2) son clave para optimizar su rendimiento, lo que afecta directamente la eficiencia de calentamiento, la distribución de la temperatura, la resistencia al choque térmico y la vida útil. El tamaño de los elementos calefactores de MoSi_2 suele determinarse por el diámetro y la longitud del extremo caliente y el extremo frío, así como por la relación entre ambos. Las especificaciones comunes incluyen $\Phi 6/12$ (diámetro del extremo caliente: 6 mm, diámetro del extremo frío: 12 mm) y $\Phi 9/18$ (diámetro del extremo caliente: 9 mm, diámetro del extremo frío: 18 mm). Estos diseños de

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

tamaño deben determinarse exhaustivamente en función del tamaño del horno, los requisitos de potencia, la frecuencia del ciclo térmico y el método de instalación para garantizar un calentamiento eficiente y una estabilidad a largo plazo en una atmósfera oxidante de alta temperatura. La especificación $\Phi 6/12$ es adecuada para hornos pequeños y medianos (como hornos de caja de laboratorio y hornos de sinterización de cerámica). Su diámetro del extremo caliente es pequeño y su alta densidad de potencia, lo que la hace ideal para aplicaciones que requieren calentamiento rápido y centralizado. La especificación $\Phi 9/18$ es adecuada para hornos grandes (como hornos de fusión de vidrio y hornos industriales de tratamiento térmico). Tiene un mayor diámetro del extremo caliente y una densidad de potencia ligeramente menor (normalmente de 15 a 20 W/cm²), pero proporciona una distribución de temperatura más uniforme y una mayor resistencia mecánica, siendo ideal para aplicaciones de calentamiento de grandes áreas o con cargas elevadas.

El objetivo principal del diseño de tamaño es equilibrar las propiedades electrotérmicas y mecánicas del extremo caliente y el extremo frío. El diámetro del extremo caliente determina la resistencia y la potencia de calentamiento. Los extremos calientes más pequeños (por ejemplo, de 6 mm) tienen mayor resistencia y son adecuados para aplicaciones de alta densidad de potencia, pero presentan menor resistencia al choque térmico y menor resistencia mecánica. Los extremos calientes más grandes (por ejemplo, de 9 mm) tienen menor resistencia y una densidad de potencia moderada, pero mejor resistencia al choque térmico y mayor vida útil. El diámetro del extremo frío suele ser de 1,5 a 2 veces el del extremo caliente (por ejemplo, 6/12 o 9/18), y la resistividad se reduce mediante el dopaje con materiales altamente conductores (por ejemplo, aluminio o tungsteno) (aproximadamente $0,5 \times 10^{-5} \Omega \cdot \text{cm}$, a temperatura ambiente), para garantizar que la temperatura del extremo frío se mantenga por debajo de 400 °C y así evitar el sobrecalentamiento y la degradación. La longitud del extremo caliente (por lo general, de 100 a 1000 mm) debe personalizarse según la profundidad del horno y el área de calentamiento. Una longitud demasiado corta puede causar concentración de calor, y una longitud demasiado larga puede causar una temperatura desigual. La longitud del extremo frío (generalmente de 50 a 300 mm) debe ser suficiente para atravesar la pared del horno y garantizar una conexión estable a la fuente de alimentación, evitando así la conducción de calor del extremo caliente al frío.

El diseño del tamaño también debe considerar las propiedades termodinámicas de MoSi₂. Su conductividad térmica (aproximadamente 45 W/(m·K) a temperatura ambiente y aproximadamente 15 W/(m·K) a 1500 °C) y coeficiente de expansión térmica (aproximadamente $8,1 \times 10^{-6} \text{K}^{-1}$, temperatura ambiente a 1000 °C) afectan la distribución de la tensión térmica. Los extremos calientes de diámetro más pequeño (como 6 mm) son propensos a la concentración de tensión térmica durante ciclos térmicos rápidos, lo que lleva a microfisuras, especialmente en la etapa frágil de baja temperatura de MoSi₂ (la tenacidad a la fractura es de aproximadamente 2-3 MPa·m^{1/2}). Los extremos calientes de diámetro más grande (como 9 mm) pueden dispersar mejor la tensión térmica y mejorar la resistencia al choque térmico. El proceso de preparación es crucial para la precisión dimensional. El prensado en caliente y la sinterización garantizan una densidad de componentes cercana al 98% y uniformidad dimensional, además de reducir los microdefectos. Los recubrimientos superficiales (como SiC o Al₂O₃) mejoran la resistencia a la oxidación y a la fatiga térmica, además de aumentar la fiabilidad del diseño dimensional. En aplicaciones prácticas, la selección del tamaño debe optimizarse en función del tipo de horno y las

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

condiciones de operación. Por ejemplo, $\Phi 6/12$ es adecuado para hornos de laboratorio de alta precisión, y $\Phi 9/18$ es adecuado para hornos industriales de gran tamaño. Es necesario evitar superar rápidamente el rango de temperatura límite de 400-700 °C para evitar la formación de polvo en la superficie.

3.3 Diseño óptimo del campo térmico y la estructura del extremo frío

El diseño optimizado del campo térmico y la estructura del extremo frío de los elementos calefactores de MoSi_2 es clave para lograr un calentamiento eficiente, una distribución uniforme de la temperatura y una larga vida útil. El diseño del campo térmico tiene como objetivo garantizar que la distribución de la temperatura en el horno cumpla con los requisitos del proceso (como la precisión de ± 5 °C en la sinterización cerámica), lo que se logra optimizando la disposición, la forma y la densidad de potencia del extremo caliente. La conductividad térmica del MoSi_2 (aproximadamente $15 \text{ W}/(\text{m}\cdot\text{K})$ a 1500 °C) y la resistividad con coeficiente de temperatura positivo (aproximadamente $4,5 \times 10^{-5}$ a 1500 °C) son muy altas. $\Omega\cdot\text{cm}$ requiere que el diseño del campo térmico coincida con precisión con el número y el espaciado de los extremos calientes. Por ejemplo, el espaciado del extremo caliente de los elementos en forma de U (20-50 mm) es adecuado para el calentamiento centralizado de hornos pequeños, y el espaciado múltiple de los extremos calientes de los elementos en forma de W (30-60 mm) es adecuado para el calentamiento uniforme de hornos grandes. La optimización del campo térmico también debe considerar la radiación térmica y la convección. La superficie y la disposición de los extremos calientes (como la disposición simétrica) afectan directamente la distribución del calor. Aumentar el número de extremos calientes o usar elementos espirales puede mejorar la uniformidad del campo térmico, pero incrementará la complejidad de fabricación. La densidad de potencia del diseño debe ser moderada ($15\text{-}25 \text{ W}/\text{cm}^2$ a 1700 °C). Una densidad de potencia demasiado alta puede causar sobrecalentamiento local y reducir la estabilidad de la película protectora de SiO_2 .

La optimización de la estructura del extremo frío tiene como objetivo reducir la temperatura del extremo frío (generalmente ≤ 400 °C) y mejorar la estabilidad de la conexión eléctrica y la vida útil del componente. El extremo frío se dopa con materiales altamente conductores (como el aluminio) para reducir la resistividad (aproximadamente $0,5 \times 10^{-5} \Omega\cdot\text{cm}$), para reducir la generación de calor, y su diámetro (12-24 mm) es 1,5-2 veces mayor que el del extremo caliente para mejorar la disipación de calor. La longitud del extremo frío (50-300 mm) debe ser lo suficientemente larga como para pasar a través de la pared del horno, ingresar a la zona de baja temperatura y conectarse a la fuente de alimentación, pero demasiado largo puede aumentar los costos de material. La conexión entre el extremo frío y el extremo caliente es un punto de concentración de tensión, y se requiere dopaje gradual o tecnología de soldadura (como soldadura por plasma) para hacer una transición suave para reducir la tensión térmica y las microfisuras. La superficie del extremo frío a menudo se recubre con un recubrimiento conductor (como una capa aluminizada) para mejorar la conductividad de contacto y prevenir la oxidación. Para optimizar el diseño del extremo frío también es necesario tener en cuenta el entorno de disipación de calor, como reducir la temperatura del extremo frío mediante una funda de aislamiento de cerámica o convección de aire para evitar el sobrecalentamiento y el deterioro del punto de conexión. La optimización coordinada de la estructura del campo caliente y del extremo frío debe combinarse con el diseño del horno y las condiciones de operación. La simulación del campo térmico

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

(como el análisis de elementos finitos) puede predecir la distribución de temperatura y guiar la disposición del extremo caliente y la asignación de potencia. El diseño de disipación de calor del extremo frío debe coincidir con el sellado de las paredes del horno y los materiales de aislamiento (como la fibra de alúmina) para garantizar la estabilidad de la temperatura del extremo frío. La fragilidad a baja temperatura del MoSi₂ (tenacidad a la fractura de aproximadamente 2-3 MPa·m^{1/2}) requiere un diseño optimizado para evitar ciclos térmicos rápidos en el rango de "plaga" de 400-700 °C para prevenir la formación de óxidos no protectores. Los recubrimientos superficiales (como SiC, con un coeficiente de expansión térmica de aproximadamente 4,5 × 10⁻⁶ K⁻¹) pueden mejorar la resistencia a la oxidación del extremo caliente y la resistencia a la corrosión del extremo frío. En aplicaciones prácticas, la inspección regular de la uniformidad del campo térmico y el estado de la conexión del extremo frío, y el ajuste de la velocidad de calentamiento y enfriamiento (5-10 °C/min) pueden garantizar la estabilidad a largo plazo del campo caliente y la estructura del extremo frío, y cumplir con aplicaciones de alta demanda como el tratamiento térmico de semiconductores y la fusión de vidrio.

3.4 Diseño de sistemas de conexión y soporte eléctricos

El diseño del sistema de conexión eléctrica y soporte de los elementos calefactores de MoSi₂ es fundamental para su estabilidad operativa, eficiencia de calentamiento y vida útil. El sistema de conexión eléctrica debe garantizar un contacto de baja resistencia entre el extremo frío y la fuente de alimentación para evitar el sobrecalentamiento local y la pérdida de potencia. Al mismo tiempo, el sistema de soporte debe proporcionar soporte mecánico, permitir la expansión térmica y reducir el estrés térmico y los riesgos de grietas. La resistividad del extremo frío de MoSi₂ (aproximadamente 0,5 × 10⁻⁵ Ω·cm, a temperatura ambiente) es mucho menor que la del extremo caliente (2,0 × 10⁻⁵ Ω·cm), y la conductividad se optimiza mediante aluminización o dopaje con materiales altamente conductores (como el tungsteno). Las conexiones eléctricas suelen utilizar una abrazadera altamente conductora (como una aleación de cobre o aluminio) para fijar el extremo frío. La superficie de la abrazadera debe estar revestida con níquel o plata para evitar la oxidación y garantizar que la resistencia de contacto sea inferior a 0,01 Ω. Se debe aplicar una fuerza de sujeción adecuada (normalmente de 5 a 10 N/cm²) al punto de conexión. Una presión excesiva puede causar fractura frágil del MoSi₂ (la tenacidad a la fractura es de aproximadamente 2 a 3 MPa·m^{1/2}), y una presión excesiva puede provocar arcos eléctricos o sobrecalentamiento.

El diseño de la conexión eléctrica también debe considerar el tipo de fuente de alimentación y el sistema de control. Los componentes de MoSi₂ son adecuados para fuentes de alimentación de control proporcional o de disparo por fase y deben estar equipados con una función de limitación de corriente (densidad de corriente máxima ≤ 10 A/mm²) para evitar la conmutación no proporcional o daños repentinos en los componentes. Los reguladores de voltaje y los transformadores pueden estabilizar la entrada (generalmente de 20 a 100 V) y adaptarse al cambio positivo de resistividad del coeficiente de temperatura de MoSi₂ (aproximadamente 4,5 × 10⁻⁵ a 1500 °C). La conexión del extremo frío debe estar equipada con un dispositivo de disipación de calor (como una camisa de refrigeración por aire o agua) para mantener la temperatura del extremo frío ≤ 400 °C y evitar el deterioro del punto de conexión. El cable debe ser resistente a altas temperaturas (como un cable de aleación de níquel) y debe ser compatible

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

con el extremo frío para evitar una resistencia de contacto excesiva. Para mejorar la fiabilidad de la conexión, se puede utilizar pasta conductora o una junta de aluminio para mejorar la conductividad del contacto.

El diseño del sistema de soporte debe garantizar la estabilidad mecánica y la libertad de expansión térmica de los elementos MoSi_2 . Los materiales de soporte comunes son alúmina de alta pureza u óxido de zirconio (ZrO_2), que coinciden con el coeficiente de expansión térmica de MoSi_2 ($8,1 \times 10^{-6} \text{ K}^{-1}$) para reducir la tensión térmica. Las formas de soporte incluyen abrazaderas, ganchos de suspensión y vigas de soporte. La suspensión vertical es adecuada para elementos en forma de U y en forma de W, y el soporte horizontal es adecuado para elementos de varilla recta. El soporte debe diseñarse como una estructura flexible para permitir que MoSi_2 se expanda a altas temperaturas (alrededor de 0,8% de expansión lineal a 1500 °C) para evitar la concentración de tensión. La superficie de soporte debe ser lisa para evitar el desgaste de la película protectora de SiO_2 en la superficie de MoSi_2 . El sistema de soporte también debe coordinarse con el material de aislamiento del horno (como fibra de alúmina) para garantizar que el extremo caliente esté expuesto a la zona de calentamiento y el extremo frío esté ubicado en la zona de baja temperatura.

El diseño coordinado del sistema de conexión eléctrica y soporte debe considerar el entorno operativo y la frecuencia de los ciclos térmicos. Una temperatura de 400-700 °C puede prevenir la formación de óxidos no protectores y proteger los puntos de conexión y las superficies del soporte. La revisión regular del estado de contacto de la abrazadera, el desgaste del soporte y la temperatura del extremo frío, la limpieza de los óxidos en los puntos de conexión y el ajuste de la fuerza de sujeción pueden prolongar la vida útil del sistema. Los recubrimientos superficiales (como SiC o Al_2O_3) pueden mejorar la resistencia a la corrosión del extremo frío y la durabilidad del soporte. En aplicaciones reales, el sistema de conexión eléctrica y soporte debe personalizarse según el tipo de horno (como horno tubular o de caja) y la aplicación (como sinterización de cerámica o tratamiento térmico de metales) para garantizar el funcionamiento estable del elemento calefactor de MoSi_2 en una atmósfera oxidante a alta temperatura.

3.5 Estructura del terminal y método de conexión

La estructura del terminal y el método de conexión del elemento calefactor de disiliciuro de molibdeno (MoSi_2) tienen un impacto clave en su rendimiento eléctrico, estabilidad mecánica y vida útil. El terminal generalmente se refiere a la parte del extremo frío, que es responsable de la conexión al sistema de energía. Debe garantizar un contacto de baja resistencia, alta conductividad y resistencia a la corrosión a alta temperatura, al tiempo que soporta la expansión térmica y la tensión mecánica. La resistividad del extremo frío de MoSi_2 (aproximadamente $0,5 \times 10^{-5}$ a temperatura ambiente) $\Omega \cdot \text{cm}$ es significativamente menor que la del extremo caliente (aproximadamente $2,0 \times 10^{-5}$ a temperatura ambiente) mediante el dopaje con materiales altamente conductores. $\Omega \cdot \text{cm}$), y su diámetro suele ser 1,5-2 veces mayor que el del extremo caliente (como las especificaciones $\Phi 6/12$ o $\Phi 9/18$) para reducir la generación de calor y mantener la temperatura del extremo frío por debajo de 400 °C. El diseño de la estructura del extremo debe optimizar la zona de transición entre el extremo frío y el extremo caliente para reducir la concentración de tensiones y prevenir la aparición de microfisuras, especialmente en la

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

etapa frágil de baja temperatura del MoSi₂ (la tenacidad a la fractura es de aproximadamente 2-3 MPa·m^{1/2}). Las estructuras de extremo comunes incluyen los tipos de transición rectos, curvos y cónicos. Los extremos fríos rectos son adecuados para elementos de varilla en forma de U y rectos. Los extremos fríos curvos (como las curvas de 90°) son adecuados para hornos en forma de W o con espacio limitado. El tipo de transición cónica suaviza la conexión entre el extremo caliente y el extremo frío mediante un cambio gradual de diámetro para reducir la tensión térmica.

Los métodos de conexión incluyen principalmente la conexión por abrazadera, la conexión por soldadura y la conexión por pernos. La conexión por abrazadera es el método más común. Se utiliza una abrazadera de alta conductividad (como una aleación de cobre o aluminio, con revestimiento de níquel o plata en la superficie) para fijar el extremo frío. La resistencia de contacto debe controlarse por debajo de 0,01 Ω. La fuerza de sujeción debe ser moderada (5-10 N/cm²). Una presión demasiado fuerte puede causar una fractura frágil de MoSi₂, y una presión demasiado floja puede causar arcos eléctricos o sobrecalentamiento local. Para mejorar la conductividad del contacto, se puede aplicar un recubrimiento aluminizado o una pasta conductora a la superficie del extremo frío. La conexión por soldadura conecta el extremo frío a una junta conductora (como una aleación a base de níquel) mediante soldadura por plasma o soldadura por resistencia. Es adecuada para aplicaciones de alta precisión, pero la temperatura debe controlarse durante el proceso de soldadura para evitar el deterioro del extremo caliente. La conexión por pernos es adecuada para grandes hornos industriales. El extremo frío se fija con pernos y juntas resistentes a altas temperaturas. Es fácil de instalar, pero la resistencia de contacto es ligeramente superior. Es necesario comprobarlo periódicamente para detectar posibles holguras. El método de conexión debe ser compatible con el sistema de alimentación. Se recomienda utilizar fuentes de alimentación de control proporcional o de disparo por fase con limitación de corriente (densidad de corriente máxima ≤10 A/mm²) para componentes MoSi₂ para evitar que los interruptores no proporcionales dañen los componentes.

La optimización de la estructura del terminal y el método de conexión debe considerar los ciclos térmicos y los factores ambientales. Los ciclos térmicos frecuentes pueden causar acumulación de tensión térmica en la conexión del extremo frío, lo que puede causar microfisuras o un aumento de la resistencia de contacto, especialmente en el rango de temperatura de "plaga" de 400 a 700 °C, donde los óxidos no protectores (mezclas de MoO₃ y SiO₂) pueden corroer los puntos de conexión. Para mejorar la durabilidad, el extremo frío puede recubrirse con una capa protectora de SiC o Al₂O₃ (el coeficiente de expansión térmica es de aproximadamente $4,5 \times 10^{-6} \text{K}^{-1}$ y $8 \times 10^{-6} \text{K}^{-1}$, respectivamente) para mejorar la resistencia a la oxidación y la corrosión. El diseño de disipación de calor (como refrigeración por aire o manguitos de aislamiento cerámico) puede mantener el extremo frío bajo y prolongar la vida útil del punto de conexión. En la práctica, la comprobación regular de la integridad de la abrazadera o la unión soldada, la limpieza del óxido y el ajuste de la fuerza de sujeción garantizan la estabilidad a largo plazo de la conexión del terminal. El diseño de la estructura del extremo y el método de conexión también deben coordinarse con el material de aislamiento del horno (como la fibra de alúmina) y el sistema de soporte para garantizar que el extremo frío se encuentre en la zona de baja temperatura y cumpla con los requisitos de fiabilidad de aplicaciones de alta temperatura, como la sinterización de cerámica y la fusión de vidrio.

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

3.6 Puntos clave del diseño de personalización de productos

El diseño personalizado de los elementos calefactores de MoSi₂ es clave para satisfacer las necesidades específicas de cada tipo de horno y proceso, lo que implica una optimización integral de la estructura, el tamaño, la modificación del material y las condiciones de operación. El diseño personalizado requiere determinar la forma, la densidad de potencia, el rango de temperatura y el método de instalación del elemento según el escenario de aplicación (como hornos tubulares de laboratorio, hornos industriales de sinterización de cerámica, hornos de fusión de vidrio u hornos de tratamiento térmico de semiconductores) para lograr un calentamiento eficiente, un campo de temperatura uniforme y una larga vida útil. Las propiedades termodinámicas del MoSi₂ y su resistividad con coeficiente de temperatura positivo ofrecen flexibilidad para un diseño personalizado, pero su fragilidad a baja temperatura exige que se consideren plenamente la tensión térmica y la estabilidad mecánica en el diseño. A continuación, se presentan varios puntos clave para un diseño personalizado.

En primer lugar, la personalización de la estructura y el tamaño debe coincidir con la geometría del horno y los requisitos de calentamiento. Los elementos en forma de U (diámetro del extremo caliente 6-9 mm, longitud 100-500 mm) son adecuados para el calentamiento centralizado de hornos pequeños, los elementos en forma de W (longitud del extremo caliente 200-1000 mm) son adecuados para el calentamiento uniforme de hornos grandes, los tipos espirales son adecuados para los requisitos de alta densidad térmica de hornos tubulares, y los tipos de varilla recta son adecuados para el calentamiento lineal de larga distancia. La relación de diámetro del extremo caliente al extremo frío (como Φ6/12 o Φ9/18) debe optimizarse según la densidad de potencia, y la longitud y el espaciado del extremo caliente deben simularse mediante un campo térmico (como el análisis de elementos finitos) para garantizar la uniformidad de la temperatura (± 5 °C). La longitud del extremo frío (50-300 mm) debe ser suficiente para atravesar la pared del horno y entrar en la zona de baja temperatura. Los tipos de hornos especiales pueden requerir formas no estándar (como los tipos en forma de L o con múltiples curvas) y el radio de curvatura debe controlarse con precisión (generalmente ≥ 10 mm) para reducir la concentración de tensión térmica.

En segundo lugar, la modificación del material y el tratamiento superficial son elementos clave en el diseño personalizado. La pureza del MoSi₂ ($\geq 99,5$ %) afecta directamente la resistencia a la oxidación y la conductividad térmica. Las materias primas de alta pureza pueden reducir el debilitamiento de los límites de grano causado por impurezas (como Fe y Al). La modificación con dopaje (como la adición de Y₂O₃ o Al₂O₃) puede mejorar la resistencia de los límites de grano y la resistencia al choque térmico, lo cual resulta adecuado para aplicaciones con ciclos térmicos frecuentes. Los recubrimientos superficiales (como SiC o Al₂O₃) pueden prolongar la vida útil de las películas protectoras de SiO₂ y mejorar su capacidad para resistir la oxidación por inducción. El espesor del recubrimiento (10-50 μm) debe optimizarse en función de la temperatura y la atmósfera de funcionamiento. Un espesor demasiado grueso puede provocar desprendimiento, mientras que un espesor demasiado fino resultará en una protección insuficiente. El proceso de preparación (como el prensado en caliente y la sinterización) debe garantizar la densidad (cercana al 98%), reducir los defectos microscópicos y mejorar las propiedades mecánicas y termodinámicas.

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

En tercer lugar, la personalización de las condiciones de operación debe considerar la temperatura, la atmósfera y la frecuencia del ciclo térmico. La temperatura máxima de operación de los componentes de MoSi₂ puede alcanzar los 1850 °C en una atmósfera oxidante, pero debe reducirse por debajo de los 1500 °C en un entorno reductor o de vacío para evitar que la película de SiO₂ falle. El diseño personalizado debe aclarar el tipo de atmósfera (como el contenido de humedad, el contenido de impurezas). Un entorno de alta humedad puede causar la hidratación de la película de SiO₂ y reducir la conductividad térmica. Las aplicaciones con altas frecuencias de ciclo térmico (como el tratamiento térmico de semiconductores) necesitan optimizar las velocidades de calentamiento y enfriamiento (5-10 °C/min) para evitar el paso rápido a través de 400-700 °C. El sistema de control de potencia debe coincidir con las características de resistencia de MoSi₂, utilizar una fuente de alimentación de control proporcional y estar equipado con un regulador de voltaje (20-100 V) y una función de limitación de corriente para evitar la sobrecarga.

Finalmente, el diseño personalizado para la instalación y el mantenimiento debe coordinarse con la estructura del horno. La suspensión vertical es adecuada para elementos en forma de U y W, el soporte horizontal es adecuado para el tipo de varilla recta, y el material del soporte (como la alúmina, con un coeficiente de expansión térmica de aproximadamente $8 \times 10^{-6} \text{ K}^{-1}$) debe coincidir con el MoSi₂ para permitir la expansión térmica (aproximadamente 0,8 %, 1500°C). Las conexiones eléctricas deben usar abrazaderas de alta conductividad o juntas soldadas para garantizar que la resistencia de contacto sea inferior a 0,01 Ω. El diseño personalizado debe proporcionar pautas de mantenimiento, incluida la inspección regular de la temperatura del extremo frío, el estado de la película de SiO₂ y la integridad del punto de conexión, y la limpieza de impurezas del horno (como óxidos de metales alcalinos). A través de la simulación del campo térmico, la optimización del material y la adaptación a las condiciones de operación, los diseños personalizados pueden cumplir con los requisitos de rendimiento de aplicaciones específicas y extender la vida útil de los elementos calefactores de MoSi₂ en entornos de alta temperatura.



CTIA GROUP LTD Varilla de molibdeno de silicio

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

Capítulo 4 Proceso de fabricación del elemento calefactor MoSi₂

4.1 Principios de selección y dosificación de materias primas

de disiliciuro de molibdeno (MoSi₂) comienzan con la selección y proporción de las materias primas, cuya calidad afecta directamente las propiedades termodinámicas, la resistencia a la oxidación y la vida útil de los elementos. El MoSi₂ es un compuesto intermetálico con la fórmula química MoSi₂ . Debe sintetizarse a partir de materias primas de molibdeno (Mo) y silicio (Si) de alta pureza, generalmente preparadas en forma de polvo mediante pulvimetalurgia. El principio básico de la selección de la materia prima es garantizar una alta pureza (generalmente $\geq 99,5\%$) y un bajo contenido de impurezas para reducir el riesgo de debilitamiento del límite de grano y oxidación no protectora. El polvo de molibdeno requiere una pureza de $\geq 99,9\%$ y el contenido de las principales impurezas (como Fe, Al, C) debe ser inferior al 0,01%, porque el Fe y el Al pueden causar corrosión del límite de grano y reducir la resistencia al choque térmico; las impurezas de carbono pueden generar carburos y afectar la resistividad. El polvo de silicio también debe ser de alta pureza ($\geq 99,9\%$) para evitar impurezas no metálicas como el oxígeno y el nitrógeno, que causan defectos en la película protectora de SiO₂ . La distribución del tamaño de partícula es otro factor clave. El tamaño de partícula del polvo de molibdeno y el polvo de silicio suele estar controlado entre 1 y 10 μm . Las partículas demasiado grandes pueden causar una sinterización desigual, mientras que las partículas demasiado pequeñas incrementarán el coste de preparación.

El principio de dosificación se basa en la relación estequiométrica de MoSi₂ (Mo:Si = 1:2), y la relación teórica de masas de molibdeno a silicio es de aproximadamente 2,55:1. Para garantizar una reacción completa, la proporción real puede variar ligeramente de la relación estequiométrica; por ejemplo, el contenido de silicio se incrementa entre un 0,5 % y un 1 % para compensar la pérdida por volatilización durante la sinterización a alta temperatura. La modificación con dopaje es un método importante para optimizar el rendimiento. Entre los dopantes más utilizados se incluyen óxidos de tierras raras (como Y₂O₃). La₂O₃ , añadido en una cantidad de 0,1-1 % en peso para mejorar la resistencia del límite de grano y la resistencia al choque térmico, o alúmina para mejorar la estabilidad de la película de SiO₂ . Los dopantes deben ser de alta pureza ($\geq 99,95\%$) para evitar la introducción de impurezas adicionales. El proceso de dosificación debe llevarse a cabo en una atmósfera inerte (como argón) o en un entorno de vacío para prevenir la oxidación de las materias primas. La uniformidad de la mezcla es fundamental para el rendimiento final. Generalmente se utilizan molinos de bolas planetarios o mezcladores de tipo V para mezclar, y el tiempo y la velocidad de molienda de bolas se controlan para evitar la rotura o contaminación de partículas.

La selección y proporción de materias primas también deben considerar el proceso de preparación y los requisitos de la aplicación. Por ejemplo, la sinterización por prensado en caliente requiere partículas más finas (1-5 μm) para mejorar la densidad (cerca del 98%), mientras que la síntesis autopropagante de alta temperatura (SHS) puede aceptar partículas ligeramente más grandes (5-10 μm) para reducir costos. Para aplicaciones de alta precisión (como el tratamiento térmico de semiconductores), se deben seleccionar materias primas de pureza ultraalta ($\geq 99,99\%$) y se debe controlar estrictamente la precisión de la proporción ($\pm 0,1\%$). El proceso de control de calidad incluye análisis de composición química

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

(como ICP-MS) y detección de distribución de tamaño de partícula (como analizador láser de tamaño de partícula) para garantizar que las materias primas cumplan con los requisitos de diseño. La selección y proporción razonables de la materia prima sientan las bases para el moldeo y sinterización posteriores, asegurando la estabilidad y confiabilidad de los elementos de calentamiento de MoSi_2 en atmósferas oxidantes de alta temperatura.

4.2 Metalurgia de polvos y proceso de prensado isostático

La pulvimetalurgia es el proceso principal para la fabricación de elementos calefactores de MoSi_2 . Combinada con el prensado isostático, permite producir elementos de alta densidad y alto rendimiento, adecuados para estructuras en forma de U, W, varilla recta y espiral. El proceso de pulvimetalurgia incluye cuatro pasos principales: mezcla de materia prima, moldeo, sinterización y posprocesamiento. Entre ellos, el prensado isostático es la tecnología de moldeo clave, que puede garantizar la precisión dimensional y la uniformidad microestructural de los elementos. La conductividad térmica (aproximadamente $15 \text{ W}/(\text{m}\cdot\text{K})$ a 1500°C), el coeficiente de expansión térmica (aproximadamente $8,1 \times 10^{-6} \text{ K}^{-1}$) y la resistencia a la oxidación del MoSi_2 dependen de una alta densidad ($\geq 98\%$) y una baja tasa de defectos. La combinación de pulvimetalurgia y prensado isostático puede satisfacer eficazmente estos requisitos.

Mezcla de materias primas : El proceso de mezcla mezcla uniformemente polvo de molibdeno y polvo de silicio de alta pureza en una proporción estequiométrica ($\text{Mo}:\text{Si} = 1:2$) o con un ligero aumento de silicio (con un aumento del silicio del 0,5-1 %), generalmente mediante un molino de bolas planetario o un mezclador en V en atmósfera inerte (como argón) o en un entorno de vacío. El medio de molienda es alúmina o zirconio de alta pureza, la proporción bola-material se controla entre 2:1 y 5:1, y el tiempo de mezcla es de 4 a 8 horas para garantizar una dispersión uniforme de las partículas sin contaminación. Se utilizan dopantes (como Y_2O_3 , Durante la etapa de mezcla, se añade Al_2O_3 en una cantidad de 0,1-2 % en peso). Es necesario controlar el tamaño de partícula para garantizar una distribución uniforme. El polvo mezclado se tamiza para eliminar las partículas aglomeradas y se seca para eliminar la humedad.

Prensado isostático : El prensado isostático (prensado isostático en frío, CIP) es la principal tecnología para la formación de elementos calefactores de MoSi_2 . El polvo mezclado se prensa hasta obtener la forma deseada (como un cuerpo verde en forma de U, W o varilla recta) aplicando una presión uniforme en un medio líquido (como agua o aceite). Las ventajas del prensado isostático son la presión uniforme y la alta densidad del cuerpo verde, lo que reduce la contracción irregular durante la sinterización posterior. El molde suele estar hecho de caucho flexible o poliuretano, resistente a la presión y sin reacción química con el polvo de MoSi_2 .

Los parámetros del proceso incluyen la presión, el tiempo de mantenimiento y la uniformidad del llenado de polvo, y es necesario asegurar que el cuerpo verde esté libre de grietas y delaminación. Las formas complejas (como las espirales) pueden requerir moldeo segmentado o combinación con tecnología de preformado. Para mejorar la resistencia del cuerpo verde, se puede añadir una pequeña cantidad de aglutinante orgánico, que se elimina durante la presinterización posterior.

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

Proceso de sinterización : La sinterización es un paso clave en la pulvimetalurgia, que permite que el cuerpo verde de MoSi_2 alcance una alta densidad y forme una estructura cristalina tetragonal tipo α estable. Los métodos comunes de sinterización incluyen la sinterización por prensado en caliente (HP) y la sinterización sin presión. La sinterización por prensado en caliente es más adecuada para elementos de calentamiento de MoSi_2 de alto rendimiento. La sinterización por prensado en caliente se lleva a cabo al vacío o en atmósfera inerte (argón), con una temperatura controlada a 1600-1800 °C, una presión de 20-40 MPa y un tiempo de mantenimiento de 1-3 horas. Durante el proceso de sinterización, el molibdeno reacciona con el silicio para formar MoSi_2 , mientras que los dopantes (como Y_2O_3) promueven la unión de los límites de grano y reducen la porosidad. La temperatura de sinterización debe controlarse con precisión. Una temperatura demasiado alta puede causar la volatilización del Si y reducir la calidad de la película de SiO_2 ; Una temperatura demasiado baja puede resultar en una densidad insuficiente, lo que afecta la conductividad térmica y la resistencia al choque térmico. La sinterización sin presión es adecuada para aplicaciones con costos ajustados, con una temperatura de 1700-1900 °C, pero la densidad es baja, lo que puede aumentar el riesgo de microfisuras.

Posprocesamiento : Los componentes de MoSi_2 sinterizados requieren posprocesamiento, que incluye pulido superficial, recorte dimensional y aplicación de recubrimientos protectores. El pulido superficial (con rueda de diamante) elimina defectos superficiales y reduce el riesgo de concentración de tensiones térmicas. El recorte dimensional garantiza que los componentes cumplan con las especificaciones de diseño. Los recubrimientos protectores se aplican mediante pulverización de plasma o deposición química en fase de vapor (CVD) para mejorar la resistencia a la oxidación y la resistencia a la oxidación por plagas. Las inspecciones de calidad incluyen pruebas de densidad (método de Arquímedes), análisis de microestructura (MEB) y medición de resistividad para garantizar que el rendimiento del componente cumpla con los requisitos de aplicación de sinterización de cerámica, fusión de vidrio, etc.

La optimización de los procesos de pulvimetalurgia y prensado isostático requiere una consideración integral del costo y el rendimiento. El prensado en caliente combinado con el prensado isostático permite producir componentes de alta densidad, ideales para aplicaciones de alta precisión (como el tratamiento térmico de semiconductores); la sinterización sin presión es económica y adecuada para hornos industriales de gran escala. El control del proceso debe evitar el rango de temperatura límite de 400-700 °C para prevenir la formación de óxidos no protectores. Se deben verificar periódicamente la pureza de las materias primas, la calidad del cuerpo verde y los parámetros de sinterización para garantizar la estabilidad y fiabilidad de los elementos calefactores de MoSi_2 en atmósferas oxidantes de alta temperatura.

4.3 Tecnología de sinterización y posprocesamiento a alta temperatura

La sinterización a alta temperatura es el proceso principal en la fabricación de elementos calefactores de disiliciuro de molibdeno (MoSi_2). Su objetivo es transformar el cuerpo verde formado en un componente con alta densidad ($\geq 98\%$ de densidad teórica), excelentes propiedades mecánicas y una estructura cristalina tetragonal tipo α estable, asegurando que su conductividad térmica, resistencia a la oxidación y resistencia al choque térmico cumplan con los requisitos de aplicaciones de alta temperatura. El proceso

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

de sinterización se lleva a cabo generalmente al vacío o en una atmósfera inerte (como argón) para prevenir la oxidación. Los métodos comunes incluyen la sinterización por prensado en caliente (HP), la sinterización sin presión y la síntesis autopropagante a alta temperatura (SHS). La sinterización por prensado en caliente es el proceso principal para componentes de MoSi_2 de alto rendimiento. La temperatura se controla a 1600-1800 °C, la presión es de 20-40 MPa y el tiempo de mantenimiento es de 1-3 horas. La alta temperatura permite que el molibdeno reaccione completamente con el silicio para formar MoSi_2 , mientras que el dopante promueve la unión de los límites de grano y reduce la porosidad. La temperatura de sinterización debe controlarse con precisión. Si es demasiado alta, el silicio puede volatilizarse y debilitar la calidad de la película protectora superficial de SiO_2 ; si es demasiado baja, la densidad será insuficiente (<95%), lo que reduce la conductividad térmica y la resistencia al choque térmico.

La tecnología de posprocesamiento es crucial para optimizar el rendimiento de los componentes de MoSi_2 , incluyendo el pulido superficial, el recorte dimensional y las pruebas de rendimiento. El pulido superficial utiliza muelas de diamante o abrasivos de alúmina para eliminar defectos superficiales (como microporos y nódulos de sinterización) formados durante la sinterización, reducir la concentración de tensión térmica y mejorar la resistencia al choque térmico. El recorte dimensional garantiza que los componentes cumplan con las especificaciones de diseño mediante mecanizado de precisión (como el corte CNC) para cumplir con los requisitos de precisión de estructuras en forma de U, W o espiral. Las pruebas de rendimiento incluyen pruebas de densidad (método de Arquímedes, objetivo $\geq 98\%$), análisis de microestructura y medición de resistividad para garantizar la consistencia del rendimiento eléctrico y térmico de los componentes. El tratamiento de preoxidación puede generar una densa película protectora de SiO_2 sobre la superficie para mejorar la resistencia a la oxidación y la capacidad antioxidación. El posprocesamiento también debe realizarse en una atmósfera inerte, evitando el rango de temperatura de 400 a 700 °C para evitar la generación de óxidos no protectores (mezcla de MoO_3 y SiO_2). Un posprocesamiento de alta calidad puede mejorar significativamente la estabilidad y la vida útil de los componentes de MoSi_2 en atmósferas oxidantes de alta temperatura, satisfaciendo así las necesidades de aplicaciones de alta precisión, como el tratamiento térmico de semiconductores.

4.4 Tecnología de capa de protección de superficie

La tecnología de capa protectora de superficies es una parte importante de la fabricación de elementos calefactores de MoSi_2 . Al aplicar un recubrimiento protector, se mejoran la resistencia a la oxidación, al choque térmico y a la corrosión, y se prolonga la vida útil del elemento en una atmósfera oxidante de alta temperatura. El MoSi_2 forma naturalmente una película protectora de SiO_2 por encima de los 800 °C, pero a temperaturas extremas o ciclos térmicos frecuentes, la película de SiO_2 puede adelgazarse debido a la volatilización de Si o MoO_3 , especialmente en el rango de temperatura de "plaga" de 400-700 °C, que es propenso a la formación de polvo. La capa protectora de superficies compensa las deficiencias de la película de SiO_2 mediante la aplicación de un recubrimiento de óxido (como Al_2O_3 , ZrO_2), un recubrimiento de carburo (como SiC) o un recubrimiento compuesto (como Al_2O_3 - SiC). El recubrimiento de Al_2O_3 (punto de fusión aproximado de 2050 °C) se aplica mediante pulverización de plasma o deposición química en fase de vapor (CVD) con un espesor de 10-50 μm . Presenta una alta

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

resistencia a la oxidación y un bajo coeficiente de difusión de oxígeno, y es adecuado para hornos de sinterización de cerámica. El recubrimiento de SiC se aplica mediante sinterización reactiva o CVD con un espesor de 20-100 μm . Presenta una mayor resistencia al choque térmico y al desgaste, y es adecuado para hornos de fusión de vidrio. Los recubrimientos compuestos combinan las ventajas de múltiples materiales, como el Al_2O_3 y el SiC. recubrimientos que tienen alta resistencia a la oxidación y al choque térmico y son adecuados para condiciones de trabajo complejas.

El proceso de aplicación del recubrimiento tiene un impacto significativo en el rendimiento. La pulverización de plasma permite formar recubrimientos gruesos y densos, adecuados para la producción a escala industrial, pero puede presentar microporos que reducen ligeramente la conductividad térmica. El proceso de CVD produce recubrimientos uniformes y delgados (10-30 μm) con alta adhesión y baja tensión térmica, adecuados para aplicaciones de alta precisión, pero su coste es relativamente elevado. El espesor del recubrimiento debe controlarse con precisión. Un espesor demasiado grueso puede causar desprendimiento debido a la discordancia de la expansión térmica, y un espesor demasiado fino puede proporcionar una protección insuficiente. El diseño de la interfaz (como la adición de una capa de transición de SiC) puede mejorar la unión entre el recubrimiento y el sustrato de MoSi_2 y reducir la tensión térmica. El recubrimiento también debe soportar alta humedad o atmósferas corrosivas (como gases con azufre). Los recubrimientos de Al_2O_3 pueden hidratarse en entornos con alta humedad, por lo que es necesario optimizar los parámetros del proceso. Las inspecciones de calidad incluyen la medición del espesor del recubrimiento (ultrasónica o SEM), pruebas de adhesión (método de rayado) y pruebas de resistencia a la oxidación para garantizar el rendimiento del recubrimiento. La optimización de la tecnología de la capa de protección superficial debe combinarse con el entorno de aplicación. Los hornos de tratamiento térmico de semiconductores requieren recubrimientos de CVD de alta pureza para evitar la contaminación, y los hornos de fundición de vidrio prefieren recubrimientos gruesos de SiC para mejorar la resistencia al choque térmico. La comprobación periódica de la integridad del recubrimiento y su rápida transición a temperaturas de 400-700 $^{\circ}\text{C}$ pueden prevenir la oxidación por plagas y su degradación. En el futuro, se espera que los recubrimientos nanoestructurados y los recubrimientos compuestos multicapa mejoren aún más el rendimiento superficial de los componentes de MoSi_2 para cumplir con los requisitos de aplicaciones de alta temperatura más exigentes.

4.5 Tecnología de soldadura y procesamiento de extremos

La tecnología de soldadura y procesamiento de extremos es la etapa final de la fabricación de elementos calefactores de MoSi_2 . Su objetivo es garantizar la estabilidad y el rendimiento electrotérmico de la conexión del extremo frío a la fuente de alimentación, a la vez que se optimiza la estructura del extremo para soportar tensiones mecánicas y térmicas. El extremo frío de MoSi_2 se dopa con materiales altamente conductores (como aluminio o tungsteno) para reducir la resistividad. Su diámetro es de 1,5 a 2 veces mayor que el del extremo caliente y debe mantenerse bajo para evitar la degradación por sobrecalentamiento. La tecnología de soldadura se utiliza para conectar el extremo frío a la unión conductora (como una aleación de níquel o de cobre), lo que garantiza una baja resistencia de contacto ($<0,01 \Omega$) y una alta resistencia mecánica. Los métodos de soldadura más comunes incluyen la soldadura por plasma y la soldadura por resistencia. La soldadura por plasma se realiza en una atmósfera inerte

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

(como argón) y la temperatura se controla a 1200-1400 °C. Permite formar una soldadura uniforme y de alta resistencia, ideal para aplicaciones de alta precisión (como el tratamiento térmico de semiconductores). La soldadura por resistencia utiliza alta corriente para calentar rápidamente el extremo frío y la unión. Es económica, pero la uniformidad de la soldadura es ligeramente inferior, lo que la hace adecuada para hornos industriales. Durante el proceso de soldadura, deben evitarse temperaturas excesivas para prevenir la degradación de la estructura cristalina de MoSi₂ en el extremo caliente o daños en la película de SiO₂.

La tecnología de procesamiento final incluye el tratamiento de la superficie del extremo frío, el recorte dimensional y la aplicación de un revestimiento conductor. La superficie del extremo frío se pule mecánicamente para eliminar las capas de óxido y los defectos para mejorar la calidad de contacto con la abrazadera o la soldadura. El recorte dimensional utiliza mecanizado CNC o corte de diamante para garantizar que el diámetro y la longitud del extremo frío cumplan con la tolerancia de diseño y sean adecuados para componentes de varilla en forma de U, en forma de W o recta. Los revestimientos conductores (como las capas aluminizadas, de 5-20 μm de espesor) se aplican mediante galvanoplastia o pulverización térmica para mejorar la conductividad del extremo frío, reducir la resistencia de contacto y prevenir la corrosión por oxidación. El procesamiento final también necesita optimizar la zona de transición entre el extremo caliente y el extremo frío, utilizando tecnología de transición cónica o dopaje de gradiente para suavizar la distribución de la tensión térmica y reducir el riesgo de microfisuras (la tenacidad a la fractura de MoSi₂ es de aproximadamente 2-3 MPa·m^{1/2}). El proceso de procesamiento debe llevarse a cabo en una atmósfera inerte para evitar el rango de temperatura "plaga" de 400 a 700 °C y evitar la formación de óxidos no protectores.

La optimización de la soldadura y el procesamiento de extremos debe tener en cuenta las condiciones de operación y los métodos de instalación. Los ciclos térmicos frecuentes pueden causar concentración de tensión en la soldadura o el extremo, y la integridad de la soldadura y la temperatura del extremo frío deben comprobarse regularmente. Se pueden aplicar recubrimientos protectores (como SiC o Al₂O₃, de 10 a 50 μm de espesor) al extremo frío para mejorar la resistencia a la corrosión y al choque térmico. La inspección de calidad incluye pruebas de resistencia de la soldadura (ensayo de tracción o cizallamiento), medición de la resistencia de contacto y análisis de microestructura (SEM) para garantizar el rendimiento del extremo. En aplicaciones prácticas, la soldadura y el procesamiento de extremos deben coordinarse con los sistemas de conexión eléctrica (como abrazaderas de cobre) y el diseño del soporte (soporte de alúmina) para garantizar la estabilidad a largo plazo de los elementos calefactores de MoSi₂ en atmósferas oxidantes de alta temperatura para cumplir con los requisitos de aplicación de sinterización de cerámica, fusión de vidrio, etc.



CTIA GROUP LTD Varilla de silicato de molibdeno

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

Capítulo 5 Prueba de rendimiento del elemento calefactor MoSi₂

5.1 Prueba de relación entre resistividad y temperatura

La resistividad es un parámetro clave del rendimiento electro térmico de los elementos calefactores de disiliciuro de molibdeno (MoSi₂), que afecta directamente su eficiencia de calentamiento, potencia de salida y precisión del control de temperatura. El MoSi₂ tiene una característica de resistividad de coeficiente de temperatura positivo (PTC), y la resistividad aumenta con el aumento de la temperatura, lo que le permite ajustar adaptativamente la potencia a altas temperaturas y es adecuado para aplicaciones de alta temperatura como la sinterización de cerámica y la fusión de vidrio (hasta 1800-1850 °C). La prueba de la relación entre la resistividad y la temperatura tiene como objetivo cuantificar las características de resistencia del MoSi₂ a diferentes temperaturas, verificar su estabilidad electro térmica y proporcionar datos para el diseño de componentes y la optimización de los parámetros de operación. La prueba generalmente se lleva a cabo en un laboratorio o horno industrial, utilizando un comprobador de resistencia de alta precisión (como el método de cuatro sondas) y un horno de temperatura controlada para garantizar la confiabilidad de los datos.

El método de prueba consiste en colocar un elemento calefactor de MoSi₂ (tipo U, tipo W, especificaciones comunes Φ6/12 o Φ9/18) en un horno de atmósfera de oxidación controlada, aumentar gradualmente la temperatura y medir la resistividad en un rango de temperatura ambiente (25 °C) a 1800 °C. El equipo de prueba incluye una fuente de alimentación de CC de alta precisión (modo de corriente constante o voltaje constante, densidad de corriente ≤10 A/mm²), un multímetro digital (precisión ±0,1 %) y un termopar (tipo K o tipo S, precisión ±1 °C). Durante la prueba, es necesario superar rápidamente el rango de temperatura límite de 400 a 700 °C para evitar la generación de óxidos no protectores (una mezcla de MoO₃ y SiO₂) que afectan la resistividad. La resistividad (ρ) se calcula mediante la fórmula $\rho = R \cdot A / L$, donde R es la resistencia medida, A es el área de la sección transversal del extremo caliente y L es la longitud del extremo caliente. El entorno de prueba mantiene una atmósfera oxidante y la humedad es inferior al 30 % para garantizar la estabilidad de la película protectora superficial de SiO₂.

MoSi₂ es de aproximadamente $2,0 \times 10^{-5}$ a temperatura ambiente . Ω· cm, que aumenta significativamente con el aumento de la temperatura y es de aproximadamente $4,0 \times 10^{-5}$ a 1000 °C Ω· cm, aproximadamente $4,5 \times 10^{-5}$ a 1500 °C Ω· cm, hasta $4,8 \times 10^{-5}$ a 1800 °C Ω· cm. Esta característica de coeficiente de temperatura positivo hace que el elemento MoSi₂ tenga una salida de potencia estable a altas temperaturas, pero también significa que el extremo frío (dopado con aluminio o tungsteno, con una resistividad de aproximadamente $0,5 \times 10^{-5}$ Ω· cm) debe mantenerse bajo para evitar el sobrecalentamiento. Los resultados de las pruebas muestran que el cambio de resistividad con la temperatura se ve afectado por la pureza y la microestructura del material. La curva de resistividad del MoSi₂ de alta pureza es más estable, y la fluctuación de la resistividad de los componentes de alta densidad es pequeña. La modificación con dopaje puede estabilizar aún más la resistividad y reducir la dispersión en los límites de grano. La prueba también debe registrar el efecto de los ciclos térmicos en la

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

resistividad. Tras múltiples ciclos térmicos, la resistividad puede aumentar ligeramente, por lo que es necesario evaluar su estabilidad a largo plazo.

Las precauciones de prueba incluyen calibrar la precisión del equipo, garantizar la estabilidad de las conexiones del extremo frío (resistencia de contacto $< 0,01 \Omega$) y evitar atmósferas reductoras o con alta humedad (una humedad $> 70 \%$ puede causar hidratación de la película de SiO_2). Los datos de prueba se analizan ajustando curvas de resistividad-temperatura (como polinomios cuadráticos) para optimizar el diseño de los componentes y los sistemas de control de potencia. En aplicaciones prácticas, los resultados de las pruebas de resistividad guían los parámetros operativos de los componentes de MoSi_2 para garantizar el rendimiento electrotérmico y la precisión del control de temperatura en atmósferas oxidantes de alta temperatura.

5.2 Prueba de la relación entre la vida útil a alta temperatura y el rendimiento de choque térmico

La vida útil a alta temperatura y el rendimiento frente a choques térmicos son indicadores clave de rendimiento de los elementos calefactores de MoSi_2 , que determinan su fiabilidad y durabilidad en atmósferas oxidantes de alta temperatura (hasta $1800-1850 \text{ }^\circ\text{C}$). La vida útil a alta temperatura se refiere al tiempo que el elemento puede funcionar continuamente a la temperatura objetivo sin una degradación significativa del rendimiento (como deriva de resistividad, propagación de microfisuras o fallo de la película de SiO_2), y el rendimiento frente a choques térmicos se refiere a la capacidad del elemento para resistir el agrietamiento bajo cambios bruscos de temperatura (como ciclos térmicos o enfriamiento y calentamiento rápidos). La fragilidad a baja temperatura del MoSi_2 y su oxidación por "plaga" lo hacen vulnerable a daños en ciclos térmicos. Analizar la relación entre la vida útil a alta temperatura y el rendimiento frente a choques térmicos tiene como objetivo evaluar la durabilidad del elemento en condiciones reales de trabajo (como sinterización de cerámica o tratamiento térmico de metales) y proporcionar una base para optimizar materiales y diseños. Los métodos de prueba incluyen pruebas de funcionamiento a alta temperatura a largo plazo y pruebas de ciclos de choque térmico. La prueba de funcionamiento a alta temperatura a largo plazo se lleva a cabo en un horno de atmósfera oxidante. El elemento de MoSi_2 (tipo U o tipo W, $\Phi 6/12$ o $\Phi 9/18$) se coloca a la temperatura objetivo, la densidad de potencia se controla a $15-20 \text{ W/cm}^2$ y se opera continuamente durante $1000-5000$ horas. Se registran los cambios de resistividad, el estado de la película de SiO_2 superficial y la evolución de la microestructura. El equipo de prueba incluye un horno de alta temperatura (precisión de $\pm 5 \text{ }^\circ\text{C}$), un comprobador de resistencia (método de cuatro sondas, precisión de $\pm 0,1 \%$) y un microscopio (MEB, análisis de grietas y capas de película). La prueba de ciclo de choque térmico simula un calentamiento y enfriamiento rápidos. Las condiciones típicas son ciclos de 25 a $1500 \text{ }^\circ\text{C}$, velocidades de calentamiento y enfriamiento de 10 a $20 \text{ }^\circ\text{C/min}$, ciclos de 100 a 1000 veces y un paso rápido a $400-700 \text{ }^\circ\text{C}$ para evitar la oxidación por plaga. Tras las pruebas, se evaluaron el número de grietas (microscopio óptico, aumento de 50 a $200\times$), el espesor de la película de SiO_2 y los cambios de resistencia mecánica (ensayo de flexión de tres puntos, resistencia a la fractura de aproximadamente 200 a 300 MPa).

Los resultados de las pruebas muestran que la vida útil de los componentes de MoSi_2 puede alcanzar más de 5000 horas a $1500 \text{ }^\circ\text{C}$ y alrededor de $1000-2000$ horas a $1800 \text{ }^\circ\text{C}$. La vida útil se ve afectada por la

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

estabilidad de la película de SiO₂. A altas temperaturas, la volatilización de Si y la volatilización de MoO₃ pueden hacer que la capa de película se vuelva más delgada (<5 μm), reduzca la resistencia a la oxidación y aumente la resistividad en un 10-20%, lo que puede causar una degradación del rendimiento. Los componentes de MoSi₂ de alta pureza (≥99,5%) y sinterizados prensados en caliente (densidad ≥98%) tienen una vida útil más larga porque las impurezas (como Fe, Al) y los poros reducen el debilitamiento del límite de grano y la iniciación de grietas. La modificación con dopaje (como Y₂O₃, 0,1-1 % en peso) puede mejorar la resistencia del límite de grano y prolongar la vida útil entre un 10 y un 20 %. En cuanto a la resistencia al choque térmico, las microfisuras tras el ciclo térmico aparecen principalmente en la conexión entre el extremo caliente y el extremo frío. Los componentes de tipo W presentan una mejor resistencia al choque térmico que los de tipo U gracias a su diseño multiextremo caliente, y los componentes de varilla recta presentan una mejor resistencia a las grietas gracias a su estructura lineal. El recubrimiento superficial puede mejorar significativamente la resistencia al choque térmico, reducir la propagación de grietas (reduciendo la densidad de grietas entre un 30 y un 50 %) y el desprendimiento de la película de SiO₂. Las precauciones de prueba incluyen mantener una atmósfera oxidante, evitar la humedad alta (> 70%) y los entornos reductores (que pueden causar fallas en la película de SiO₂), y calibrar regularmente los termopares y los comprobadores de resistencia. Los datos de prueba guían la optimización del material (como el dopaje) y el diseño estructural (como la optimización del radio de curvatura) de los componentes de MoSi₂ mediante modelos de predicción de vida útil (como el modelo de Arrhenius) y análisis estadístico de grietas. En la práctica, los resultados de las pruebas se utilizan para formular planes de mantenimiento (como inspecciones periódicas de grietas y capas de película) y parámetros operativos para garantizar la fiabilidad a largo plazo y la estabilidad al choque térmico de los elementos calefactores de MoSi₂ en hornos de alta temperatura.

5.3 Prueba de estabilidad en ambiente oxidativo

Las pruebas de estabilidad en un entorno oxidante son clave para evaluar el rendimiento a largo plazo de los elementos calefactores de disiliciuro de molibdeno (MoSi₂) en una atmósfera oxidante de alta temperatura (hasta 1800-1850 °C), centrándose en la formación y retención de la película protectora de SiO₂ en su superficie, sus propiedades antioxidantes y la estabilidad de su microestructura. El MoSi₂ logra una excelente resistencia a la oxidación en una atmósfera oxidante al formar una densa película protectora de SiO₂ en su superficie, pero la volatilización de Si o MoO₃ a altas temperaturas puede hacer que la capa de película se vuelva más delgada, especialmente en el rango de temperatura de "plaga" de 400-700 °C, donde es propensa a la oxidación no protectora, generando una mezcla de MoO₃ y SiO₂, lo que resulta en la pulverización del material. La prueba de estabilidad está diseñada para cuantificar la vida, el cambio de resistividad y el estado de la superficie de los elementos MoSi₂ en un entorno oxidante y para proporcionar datos confiables para aplicaciones de alta temperatura, como la sinterización de cerámica y la fusión de vidrio.

Los métodos de prueba incluyen la prueba de exposición a la oxidación a largo plazo y la prueba de oxidación cíclica. La prueba de exposición a la oxidación a largo plazo coloca el elemento MoSi₂ (como el tipo U, el tipo W, Φ6/12 o Φ9/18) en un horno de atmósfera de oxidación de alta temperatura, controlado a 1500-1800 °C, con una densidad de potencia de 15-20 W/cm² y funcionando continuamente

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

durante 1000-5000 horas. El equipo de prueba incluye un horno de alta temperatura, un comprobador de resistencia (método de cuatro sondas, precisión $\pm 0,1$ %), un microscopio electrónico de barrido (MEB) y un difractómetro de rayos X (DRX) para analizar el espesor de la película de SiO_2 (objetivo 10-20 μm), la morfología superficial y la composición de la fase. La prueba de oxidación cíclica simula el ciclo térmico en condiciones reales de trabajo, con temperaturas de 25-1500 $^{\circ}\text{C}$ o de 25-1800 $^{\circ}\text{C}$, una velocidad de calentamiento y enfriamiento de 5-10 $^{\circ}\text{C}/\text{min}$, un número de ciclos de 100 a 1000 veces y un paso rápido a través de 400-700 $^{\circ}\text{C}$ para evitar la oxidación por plaga. Tras la prueba, se evaluaron los cambios de resistividad, la integridad de la película de SiO_2 , el número de grietas y la pérdida de masa.

Los resultados de las pruebas muestran que los componentes MoSi_2 tienen alta estabilidad en una atmósfera oxidante a 1500 $^{\circ}\text{C}$, con una vida útil de más de 5000 horas, la película SiO_2 permanece densa (espesor 10-15 μm), y el aumento de resistividad es menor al 10%. Los componentes MoSi_2 de alta pureza y sinterizados prensados en caliente (densidad $\geq 98\%$) tienen mejor estabilidad, menos defectos de película y una tasa de pérdida de masa menor a 0,5 $\text{mg}/\text{cm}^2/1000\text{h}$. La modificación de dopaje (tal como Y_2O_3 , 0,1-1 % en peso) puede mejorar la adhesión de la película SiO_2 y reducir el desprendimiento. Las pruebas de oxidación cíclica muestran que las grietas por choque térmico aparecen principalmente en la conexión del extremo caliente-extremo frío, y el componente tipo W es ligeramente mejor que el tipo U debido a su diseño de múltiples extremos calientes. Los recubrimientos superficiales (como SiC o Al_2O_3 , con un espesor de 10-50 μm) pueden mejorar significativamente la estabilidad y reducir la pérdida de masa entre un 30 y un 50 %. La prueba debe evitar la humedad alta (>70 %) o una atmósfera que contenga azufre para prevenir la hidratación o corrosión de la película de SiO_2 .

5.4 Prueba de dureza del elemento calefactor

El ensayo de dureza es un método importante para evaluar las propiedades mecánicas de los elementos calefactores de MoSi_2 , lo que refleja directamente su resistencia al desgaste, la tensión mecánica y la formación de grietas por choque térmico. Como compuesto intermetálico, el MoSi_2 presenta una alta dureza, pero su fragilidad a baja temperatura facilita la formación de microfisuras durante choques mecánicos o ciclos térmicos. El ensayo de dureza está diseñado para cuantificar la dureza superficial y la resistencia microestructural de los componentes de MoSi_2 , lo que proporciona una base para optimizar los procesos de fabricación (como la sinterización por prensado en caliente) y la modificación por dopaje, y para cumplir con los requisitos de estabilidad mecánica de aplicaciones como la sinterización de cerámica y el tratamiento térmico de metales.

El método de prueba adopta la prueba de dureza Vickers. Se utiliza un probador de dureza Vickers para aplicar indentación en la superficie del elemento MoSi_2 (extremo caliente y extremo frío), y se mide la longitud diagonal de la indentación (precisión $\pm 0,1$ μm) para calcular el valor de dureza. La prueba se lleva a cabo a temperatura ambiente y la superficie de la muestra debe estar limpia para evitar la influencia de la capa de óxido o impurezas. La prueba de dureza a alta temperatura utiliza un probador de dureza a alta temperatura para simular las condiciones de operación reales. Debe llevarse a cabo en una atmósfera inerte (como argón) para evitar la oxidación. Para evaluar la uniformidad de la dureza, los puntos de prueba cubren el extremo caliente, el extremo frío y la zona de transición extremo caliente-

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

extremo frío, con al menos 5 puntos en cada área, y se toma el valor promedio (desviación <5%). Las pruebas auxiliares incluyen análisis microestructural y evaluación de propagación de grietas.

Los resultados de las pruebas muestran que la dureza Vickers a temperatura ambiente de los componentes MoSi_2 es de 8-10 GPa, que cae a aproximadamente 4-6 GPa a 1500 °C debido al deslizamiento del límite de grano y los efectos de ablandamiento a altas temperaturas. Los componentes MoSi_2 de alta pureza y sinterizados prensados en caliente (densidad $\geq 98\%$) tienen mayor dureza (cerca de 10 GPa) debido a la baja porosidad (<2%) y menos defectos en los límites de grano. La modificación con dopaje (como Y_2O_3 o Al_2O_3 , 0,1-2 % en peso) puede aumentar la dureza en un 5-10% porque los óxidos de tierras raras mejoran la fuerza de enlace de los límites de grano. La dureza del extremo frío es ligeramente menor que la del extremo caliente (aproximadamente 7-9 GPa) porque el dopaje con aluminio o tungsteno reduce la resistencia del cristal. La dureza puede disminuir entre un 5 % y un 15 % tras el ciclo térmico debido a la acumulación de microfisuras. Los recubrimientos superficiales pueden mejorar significativamente la resistencia al desgaste, pero el desprendimiento del recubrimiento puede exponer el sustrato. La prueba requiere una profundidad de indentación controlada (<10 % del espesor de la muestra) para evitar efectos de matriz, y los resultados se utilizan para evaluar la durabilidad mecánica de los componentes durante la instalación, el funcionamiento y el mantenimiento.

5.5 Prueba sobre la relación entre la resistencia a la oxidación y la temperatura

La prueba de resistencia a la oxidación y la relación de temperatura es fundamental para la prueba de rendimiento del elemento calefactor de MoSi_2 . Su objetivo es evaluar su comportamiento oxidativo a diferentes temperaturas, la formación y estabilidad de la película protectora de SiO_2 , así como la pérdida de masa del material y la variación de resistividad, para proporcionar datos fiables para aplicaciones de alta temperatura (como la fusión de vidrio y el tratamiento térmico de semiconductores). La resistencia a la oxidación del MoSi_2 depende de la película protectora superficial de SiO_2 , que forma una densa capa por encima de los 800 °C, pero es propensa a generar óxidos no protectores en el rango de temperaturas de "plaga" de 400 a 700 °C, lo que resulta en la formación de polvo. A temperaturas cercanas a los 1850 °C, la volatilización del Si puede provocar un adelgazamiento de la película. La prueba está diseñada para cuantificar la variación de la resistencia a la oxidación con la temperatura y optimizar la temperatura de funcionamiento y la estrategia de mantenimiento.

Los métodos de prueba incluyen la prueba de oxidación a temperatura constante y la prueba de oxidación a temperatura variable. La prueba de oxidación a temperatura constante coloca el elemento MoSi_2 (como el tipo U, el tipo W, $\Phi 6/12$ o $\Phi 9/18$) en un horno de atmósfera oxidante con un rango de temperatura de 400 a 1800 °C, una autonomía de 100 a 1000 horas y una densidad de potencia de 15 a 20 W/cm². El equipo de prueba incluye un horno de alta temperatura (precisión de ± 5 °C), una balanza de precisión (precisión de $\pm 0,1$ mg), SEM y XRD para medir la tasa de pérdida de masa (mg/cm²/h), el espesor de la película de SiO_2 y la composición de las fases. La prueba de oxidación a temperatura variable simula ciclos térmicos en condiciones de 25-1500 °C o 25-1800 °C, con una velocidad de calentamiento y enfriamiento de 5-10 °C/min, 50-500 ciclos y un paso rápido a 400-700 °C. Tras la prueba, se evaluaron

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

el cambio de resistividad (método de cuatro sondas, precisión $\pm 0,1\%$), la integridad de la película (MEB) y la densidad de grietas (microscopio óptico, aumento 50-200x).

Los resultados de las pruebas muestran que el MoSi_2 presenta la mejor resistencia a la oxidación a 800-1500 °C, el espesor de la película de SiO_2 es estable, la tasa de pérdida de masa es inferior a 0,2 $\text{mg/cm}^2/1000$ h y el aumento de la resistividad es inferior al 10 %. A 400-700 °C, la oxidación no protectora provoca una tasa de pérdida de masa de hasta 1-2 $\text{mg/cm}^2/100$ h, y la resistividad aumenta entre un 20 % y un 30 %, siendo necesario superar este rango rápidamente. A 1800 °C, la volatilización del Si se intensifica, la película de SiO_2 se adelgaza, la tasa de pérdida de masa aumenta a 0,5-1 $\text{mg/cm}^2/1000$ h y la vida útil se acorta a 1000-2000 horas. Los componentes sinterizados de MoSi_2 de alta pureza y prensados en caliente (densidad $\geq 98\%$) presentan mayor resistencia a la oxidación y menos defectos de película. La modificación con dopaje mejora la adhesión de la película y reduce la tasa de pérdida de masa entre un 20 y un 30 %. El recubrimiento superficial mejora significativamente la resistencia a la oxidación, especialmente a 1800 °C, donde la tasa de pérdida de masa se reduce entre un 40 y un 60 %. La prueba debe evitar la humedad alta o la atmósfera reductora para garantizar la fiabilidad de los datos. Los resultados se utilizan para optimizar la temperatura de funcionamiento (recomendada entre 1500 y 1700 °C) y el plan de mantenimiento (como la inspección periódica de la capa de membrana) mediante análisis cinéticos de oxidación (como un modelo parabólico).

5.6 Relación entre la rugosidad de la superficie de la varilla y la resistividad

La rugosidad superficial es un factor importante que afecta el rendimiento electro térmico de los elementos calefactores de disiliciuro de molibdeno (MoSi_2) y está directamente relacionada con la uniformidad de su resistividad y distribución de corriente. La rugosidad superficial de los componentes de MoSi_2 está determinada principalmente por el proceso de fabricación (como el prensado en caliente y el prensado isostático) y el procesamiento posterior (como el pulido y el arenado). Las superficies con alta rugosidad pueden provocar concentración local de corriente, tensión térmica desigual y formación desigual de película protectora de SiO_2 , lo que afecta la estabilidad de la resistividad. Probar la relación entre la rugosidad superficial y la resistividad tiene como objetivo cuantificar el impacto de la morfología de la superficie en el rendimiento electro térmico, proporcionar una base para optimizar los procesos de fabricación y el diseño de componentes, y es particularmente adecuado para escenarios de control de temperatura de alta precisión como la sinterización de cerámica y la fusión de vidrio. El método de prueba utiliza un medidor de rugosidad superficial (como un perfilómetro o un microscopio de fuerza atómica, con una precisión de $\pm 0,01 \mu\text{m}$) para medir los parámetros de rugosidad superficial (como R_a , R_z) de la varilla de MoSi_2 . El área de prueba cubre el extremo caliente y el extremo frío, y la superficie de la muestra debe estar limpia para evitar la interferencia de impurezas. La prueba de resistividad utiliza un método de cuatro sondas (precisión $\pm 0,1\%$), medido en el rango de temperatura ambiente a 1800 °C, combinado con muestras de diferente rugosidad. El entorno de prueba es una atmósfera oxidante, y el rango de temperatura "plaga" de 400-700 °C se supera rápidamente para evitar la formación de óxidos no protectores. La resistividad (ρ) se calcula mediante la fórmula $\rho = R \cdot A/L$, donde R es la resistencia medida, A es el área de la sección transversal y L es la longitud de prueba. La prueba debe registrar el

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

efecto de la rugosidad de la superficie en la formación de la película de SiO₂ (observación SEM, aumento 50-200×) y la uniformidad de la distribución de la corriente (termómetro infrarrojo, precisión ±1 °C).

La resistividad de las varillas de MoSi₂ con menor rugosidad superficial es más estable y tiene un rango de fluctuación más pequeño, porque la superficie lisa reduce la concentración de corriente local y la acumulación de tensión térmica. Las superficies de alta rugosidad pueden conducir a aumentos locales en la resistividad porque los defectos superficiales aumentan la dispersión del límite de grano y las trayectorias de corriente desiguales. El elemento MoSi₂ pulido tiene una película de SiO₂ más uniforme (espesor 10-15 μm) a altas temperaturas, con menor variación de resistividad, lo que es adecuado para aplicaciones de alta precisión. Las superficies pulidas con chorro de arena o rugosas son propensas a microfisuras durante los ciclos térmicos, lo que aumenta las fluctuaciones de resistividad y afecta la estabilidad a largo plazo. La prueba requiere calibración de la precisión del equipo, control de las conexiones del extremo frío y las condiciones atmosféricas, y evitar la alta humedad (humedad > 70%) que causa la hidratación de la película de SiO₂. Los datos se analizan ajustando la curva de rugosidad-resistividad y se utilizan para optimizar el proceso de tratamiento de la superficie (como el pulido químico o la pulverización de plasma) para mejorar el rendimiento electrotérmico y la precisión del control de temperatura de los elementos MoSi₂.

5.7 Efecto de la uniformidad del recubrimiento de la varilla en la vida útil

El recubrimiento superficial de los elementos calefactores MoSi₂ (como SiC, Al₂O₃, espesor 10-50 μm) es la clave para mejorar la resistencia al choque térmico y la resistencia a la corrosión. La uniformidad del recubrimiento afecta directamente la estabilidad de la película protectora de SiO₂, la tasa de oxidación y la vida útil del elemento. Un recubrimiento desigual puede provocar una resistencia a la oxidación local insuficiente, concentración de tensión térmica o desprendimiento, y acortar el tiempo de funcionamiento del elemento en un entorno de oxidación a alta temperatura (como sinterización de cerámica, fabricación de semiconductores). Probar el efecto de la uniformidad del recubrimiento en la vida útil tiene como objetivo evaluar el efecto de la calidad del recubrimiento en la durabilidad del componente y proporcionar soporte de datos para optimizar los procesos de recubrimiento (como la deposición química de vapor y la pulverización de plasma).

Los métodos de prueba incluyen la detección de la uniformidad del recubrimiento y la prueba de vida útil a alta temperatura. La uniformidad del recubrimiento se analiza mediante microscopía electrónica de barrido (MEB, precisión ±0,1 μm) y espectrómetro de rayos X (EDS), midiendo la distribución del espesor del recubrimiento y la uniformidad de la composición (relación Si/C en SiC o relación Al/O en Al₂O₃). Las muestras incluyen varillas de MoSi₂ con diferentes procesos de recubrimiento (como recubrimiento CVD y recubrimiento por pulverización), y el área de prueba abarca las zonas de transición de los extremos caliente y frío. La prueba de vida útil a alta temperatura se realiza en un horno de atmósfera oxidante con un rango de temperatura de 1500 a 1800 °C, una densidad de potencia de 15 a 20 W/cm², una autonomía de 1000 a 5000 horas y un paso rápido de 400 a 700 °C para evitar la oxidación por deposición. La prueba registra la tasa de pérdida de masa (balanza de precisión, precisión ±0,1 mg), el estado de la película de SiO₂ (observación mediante SEM) y la variación de resistividad (método de

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

cuatro sondas, precisión $\pm 0,1$ %). Las pruebas auxiliares incluyen la adhesión del recubrimiento y la resistencia al choque térmico.

de MoSi_2 con alta uniformidad de recubrimiento (desviación de espesor $< 5\%$) se extienden significativamente, ya que el recubrimiento uniforme promueve la formación estable de la película de SiO_2 y reduce la oxidación local y el desprendimiento. Los recubrimientos CVD presentan una mayor vida útil a 1800 °C debido a su alta densidad y adhesión, lo que los hace adecuados para aplicaciones de alta demanda. Si el recubrimiento por pulverización tiene un espesor desigual (desviación $> 10\%$), puede desprenderse en la zona de transición del extremo caliente al extremo frío, lo que provoca un adelgazamiento de la película de SiO_2 , acelerando la degradación por oxidación y acortando su vida útil. Los recubrimientos uniformes también reducen la densidad de microfisuras en los ciclos térmicos y mejoran la resistencia al choque térmico. La prueba requiere el control de la atmósfera y las velocidades de calentamiento y enfriamiento para evitar la alta humedad o los entornos reductores (que provocan el fallo de la película de SiO_2). Los datos guían las estrategias de optimización del proceso de recubrimiento y mantenimiento (como la inspección regular de la integridad del recubrimiento) a través del análisis de la relación entre el espesor del recubrimiento y la vida útil para garantizar la confiabilidad a largo plazo de los componentes MoSi_2 en entornos oxidantes de alta temperatura.

5.8 Relación entre la vida útil y el acoplamiento de tensiones

de MoSi_2 se ven afectados por el acoplamiento de la tensión térmica, la tensión mecánica y la tensión ambiental, especialmente en atmósferas oxidantes de alta temperatura y ciclos térmicos frecuentes. La tensión térmica proviene del gradiente de temperatura causado por el calentamiento y enfriamiento rápidos, la tensión mecánica proviene de la vibración durante la instalación u operación, y la tensión ambiental está relacionada con atmósferas oxidantes o corrosivas. El acoplamiento de tensión puede causar la propagación de microfisuras, el desprendimiento de la película de SiO_2 o la deriva de la resistividad, acortando así la vida útil del elemento. Probar la relación entre la vida útil y el acoplamiento de tensión tiene como objetivo cuantificar el impacto de la tensión en la durabilidad de los elementos de MoSi_2 , proporcionar una base para optimizar el diseño (como la forma, el soporte) y los parámetros operativos (como la velocidad de calentamiento y enfriamiento), y es adecuado para aplicaciones de alta temperatura como la sinterización de cerámica y el procesamiento de vidrio.

Los métodos de prueba incluyen simulación de tensión y prueba de vida útil. La simulación de tensión utiliza el análisis de elementos finitos (FEA) para evaluar la distribución de la tensión térmica en la zona de transición caliente-fría (basándose en el coeficiente de expansión térmica y la conductividad térmica del MoSi_2), en combinación con pruebas de tensión mecánica (ensayo de flexión de tres puntos, precisión $\pm 0,1$ MPa). La prueba de vida útil se lleva a cabo en un horno de atmósfera oxidante, con una temperatura de 1500 - 1800 °C, una densidad de potencia de 15 - 20 W/cm², un tiempo de funcionamiento de 1000 - 5000 horas y condiciones de ciclo térmico de 25 - 1500 °C. Las muestras de prueba incluyen elementos de MoSi_2 en forma de U y de W ($\Phi 6/12$ o $\Phi 9/18$), y se aplican algunos recubrimientos superficiales (como SiC). La prueba registra la tasa de pérdida de masa (balanza de precisión, precisión $\pm 0,1$ mg), la densidad de grietas (SEM, aumento 50 - $200\times$), el estado de la película de SiO_2 y el cambio de resistividad

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

(método de cuatro sondas). Se simula el estrés ambiental mediante la introducción de trazas de gases corrosivos (como SO_2) para evaluar su impacto en la vida.

Los resultados de las pruebas muestran que la tensión térmica es el principal factor que afecta la vida útil de los componentes de MoSi_2 . El rápido aumento y descenso de la temperatura provoca la concentración de tensiones en la zona de transición entre el extremo caliente y el extremo frío, lo que aumenta la densidad de microfisuras y acorta la vida útil. El componente de tipo W presenta una distribución de tensiones más uniforme gracias al diseño de múltiples extremos calientes, y su vida útil es mayor que la del componente de tipo U. La tensión mecánica (como la vibración o una instalación incorrecta) agrava la propagación de grietas, reduce la tenacidad a la fractura y la vida útil. El recubrimiento superficial alivia significativamente el efecto de acoplamiento de tensiones, y un recubrimiento uniforme reduce el desconchado causado por la tensión térmica y prolonga la vida útil. La modificación con dopaje (como Y_2O_3) mejora la resistencia del límite de grano y reduce la sensibilidad a la tensión. La tensión ambiental (como una atmósfera corrosiva) acelera la degradación de la película de SiO_2 , por lo que la atmósfera debe controlarse estrictamente. La prueba requiere termopares calibrados (precisión ± 1 °C) y abrazaderas. Los datos guían la optimización del diseño (como el aumento del radio de curvatura) y los parámetros operativos a través de modelos de tensión-vida (como el análisis de Weibull) para garantizar la confiabilidad a largo plazo de los componentes MoSi_2 en entornos de alta temperatura y tensión compleja.

5.9 Mecanismos de agrietamiento, flexión y ablación terminal

Durante el funcionamiento prolongado a alta temperatura, los elementos calefactores de disilicuro de molibdeno suelen fallar debido a grietas, deformaciones y ablación en los extremos. Estos problemas no solo reducen su estabilidad de rendimiento, sino que también afectan directamente la seguridad operativa y la vida útil de todo el sistema de calefacción.

La mayoría de los fenómenos de agrietamiento están relacionados con la tensión térmica. Cuando el elemento calefactor se calienta o enfría rápidamente en un entorno de alta temperatura, el gradiente de temperatura entre las capas interna y externa del material es grande, lo que puede causar fácilmente una expansión térmica desigual en su interior, lo que provoca la concentración de la tensión térmica. Si el diseño estructural no es razonable, las dimensiones geométricas son asimétricas o existen defectos microscópicos en los componentes (como poros e inclusiones), la tensión térmica provocará la expansión de las microfisuras y, con el tiempo, la formación de grietas macroscópicas. Además, si el espesor de la película de óxido de silicio formada durante el proceso de oxidación es desigual, también puede inducir agrietamiento debido a las diferencias de tensión, especialmente durante el enfriamiento repentino a alta temperatura o el enfriamiento por parada.

La flexión suele ocurrir cuando la suspensión o la estructura de soporte es inestable durante el uso, o cuando el material sufre deformación plástica a altas temperaturas debido a la gravedad o a fuerzas mecánicas externas. Si bien el MoSi_2 es una cerámica frágil con baja plasticidad, su estructura experimentará cierto grado de flujo viscoso a altas temperaturas (superiores a 1500 °C), especialmente en estructuras de sección delgada y voladizos largos, que son propensas a doblarse por su propio peso a

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

altas temperaturas. Una vez formada la curva, también aumenta el riesgo de propagación de grietas durante el recalentamiento.

La ablación terminal es un fenómeno común de fallo local en los elementos calefactores de MoSi_2 , que se concentra principalmente en la zona conectada al electrodo o donde se concentra una alta densidad de corriente. Esta zona suele sufrir oxidación o evaporación severa debido a una resistencia de contacto excesiva, la ruptura del arco, la acumulación de calor o una circulación de aire local insuficiente. En condiciones de alta temperatura y alta corriente, pueden formarse puntos calientes locales en la superficie del MoSi_2 , lo que aumenta la volatilización del silicio y destruye la estructura de la película protectora, formando así picaduras de ablación o cavidades de fusión. Además, si el extremo no se procesa correctamente, por ejemplo, debido a una eliminación insuficiente de la película de óxido, una soldadura de mala calidad o una superficie de contacto insuficiente, el proceso de ablación también se acelerará. Para retrasar o evitar las fallas anteriores, es necesario optimizar el diseño estructural, el proceso de instalación, el control eléctrico y el entorno de uso, etc. Por ejemplo, adoptar un método de soporte razonable para reducir la concentración de tensión térmica, controlar la velocidad de calentamiento para reducir el riesgo de choque térmico, mejorar la estructura de contacto conductor del extremo para reducir la resistencia de contacto y garantizar la integridad de la película de óxido puede extender efectivamente la vida útil del componente.

5.10 Análisis de microestructura y estudio del modo de falla

El análisis de microestructura es fundamental para comprender el mecanismo de falla de los elementos calefactores de MoSi_2 , lo que permite revelar las causas esenciales de los cambios físicos, químicos y mecánicos en entornos de alta temperatura desde el punto de vista del cuerpo del material. Mediante la observación microscópica de la sección transversal, la superficie y la estructura interna del elemento antes y después del trabajo, se pueden identificar la estructura del grano, los cambios en los límites de fase, el comportamiento de crecimiento de la película de óxido y la posible distribución de microfisuras.

En un entorno de oxidación a alta temperatura, se forma una densa película protectora de SiO_2 sobre la superficie del material MoSi_2 , con una interfaz clara entre la película y el sustrato. Si se produce oscilación de alta temperatura o corrosión química durante el uso prolongado, puede causar desprendimiento de la interfaz o la formación de una capa de óxido porosa, lo que afecta la protección. Además, el análisis microscópico suele revelar la presencia de una pequeña cantidad de partículas de segunda fase en MoSi_2 , como Mo_5Si_3 , que también afectan la estabilidad estructural general a diferentes grados de oxidación.

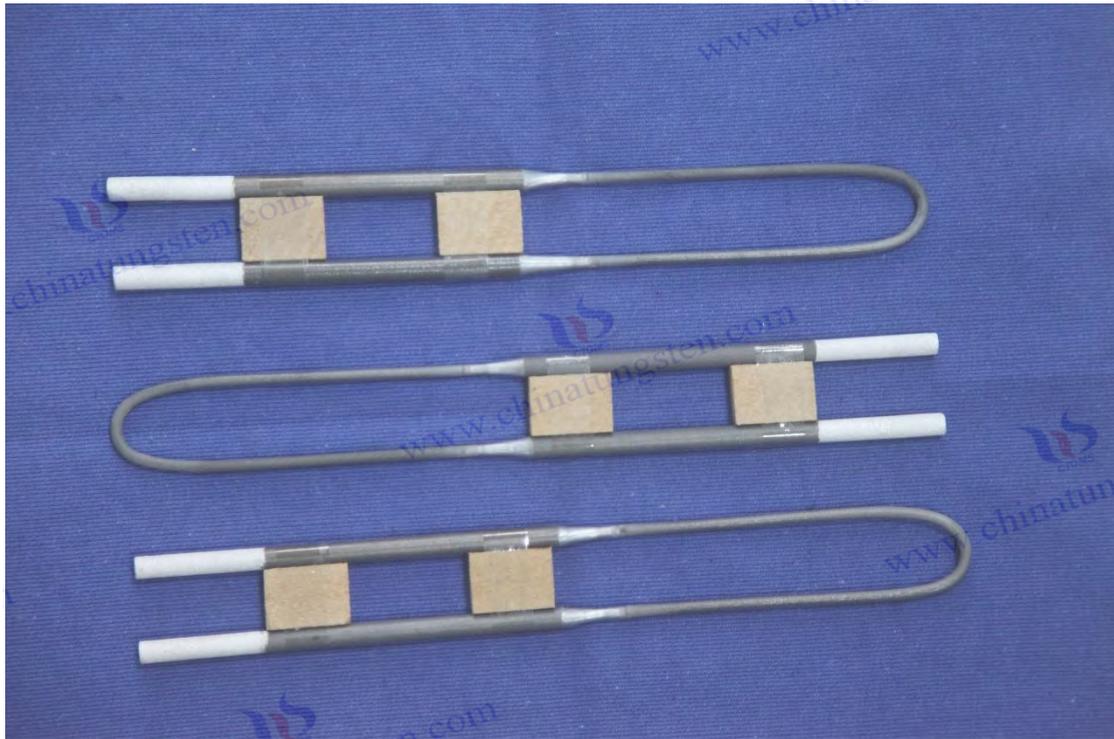
La investigación sobre modos de fallo se centra principalmente en las vías de propagación de grietas, los mecanismos de ruptura de la capa de óxido, las tendencias de difusión de elementos y los comportamientos de cambio de fase. El análisis microscópico se realiza a menudo en combinación con la microscopía electrónica de barrido (MEB) y la espectroscopia de energía dispersiva (EDS), lo que permite mostrar claramente que las grietas se originan principalmente en zonas con enlaces débiles en los límites de grano, o que el daño macroscópico se debe a las conexiones de poros inducidas por el estrés

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

oxidativo. Además, mediante el análisis de las diferencias en el espesor de la película de óxido formada a diferentes temperaturas y tiempos de operación, se puede inferir la cinética de oxidación, estableciendo así un modelo de la tasa de degradación del material.

Las investigaciones demuestran que la mayoría de las fallas se deben principalmente a los efectos combinados de oxidación, estrés térmico y defectos estructurales. Es decir, el material forma una película protectora bajo oxidación a alta temperatura, pero la diferencia de tensión durante el ciclo térmico induce la ruptura de la película, lo que provoca que la nueva superficie expuesta continúe oxidándose, lo que resulta en la concentración de tensiones y la expansión de microfisuras, lo que finalmente conduce a la destrucción de la estructura general del material. Este patrón de acumulación cíclica y gradual es un comportamiento típico de la fatiga por corrosión térmica.

Para mejorar la resistencia a fallas, investigaciones futuras pueden introducir oligoelementos aditivos (como Al, Zr, etc.) en la matriz de MoSi₂ para mejorar la estabilidad de la película de óxido, o utilizar un diseño de estructura de doble fase o gradiente para aliviar la tensión térmica. Además, controlando el tamaño de grano, optimizando el proceso de sinterización y aumentando la densidad, se puede mejorar eficazmente la uniformidad de la microestructura, reducir la tasa de defectos y mejorar la resistencia a fallas.



CTIA GROUP LTD Varilla de molibdeno de silicio

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

Capítulo 6 Instalación de elementos calefactores MoSi₂

6.1 Preparaciones previas a la instalación

Al instalar el elemento calefactor de MoSi₂, se requiere una preparación sistemática para garantizar el correcto funcionamiento en operaciones posteriores y evitar daños en el elemento o la degradación del rendimiento debido a un uso inadecuado. En primer lugar, se deben verificar las especificaciones, los niveles de voltaje, los parámetros de potencia y las dimensiones del elemento calefactor para que coincidan con el equipo, según los planos de diseño y las instrucciones de uso del equipo. De ser necesario, se debe realizar una comparación física para evitar que el funcionamiento del sistema se vea afectado por errores del modelo.

En segundo lugar, verifique la integridad de la estructura de la cavidad del horno de calentamiento, el dispositivo de soporte, la fijación del electrodo y el material aislante, especialmente para confirmar que el lugar de instalación esté limpio, libre de impurezas y tenga un buen aislamiento. El horno debe mantenerse seco para evitar que la humedad interfiera con la película de óxido de alta temperatura o provoque un cortocircuito.

Las herramientas y los materiales auxiliares utilizados en el proceso de instalación también deben prepararse con antelación, incluyendo soportes cerámicos, abrazaderas de acero inoxidable, herramientas dinamométricas, juntas aislantes y materiales conductores resistentes a altas temperaturas. Los operadores deben usar guantes aislantes limpios y tienen estrictamente prohibido tocar las partes calientes de los componentes de MoSi₂ con las manos descubiertas para evitar la contaminación por aceite que puede contribuir a la formación de una película de óxido.

Además, se debe brindar capacitación básica en seguridad a los instaladores para aclarar los procedimientos operativos, las precauciones y las medidas de protección que deben seguirse durante el transporte y la manipulación de los componentes. En el caso de equipos nuevos que se utilicen por primera vez, también se debe realizar una prueba de aumento de temperatura en el horno vacío para verificar si el sistema de control eléctrico y el comportamiento de expansión térmica del cuerpo del horno cumplen con las expectativas.

6.2 Pasos de instalación detallados

La instalación de los elementos calefactores de MoSi₂ debe realizarse estrictamente de acuerdo con los pasos estándar para garantizar un buen contacto eléctrico, soporte térmico y protección contra la oxidación durante su funcionamiento. Los pasos clave del proceso de instalación estandarizado son los siguientes:

El primer paso es confirmar la posición: confirme la posición de instalación de cada elemento calefactor según los planos del equipo y la identificación de los componentes. Preste especial atención a la simetría y el equilibrio de los electrodos al conectar varios elementos en paralelo para evitar el sobrecalentamiento

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

local causado por una carga desigual. El segundo paso es fijar el soporte: coloque el elemento calefactor de MoSi_2 sobre un soporte cerámico o una estructura de soporte y ajuste su posición adecuadamente para asegurar que la parte calefactora esté centrada y sin obstrucciones en el espacio del horno. La estructura de soporte debe tener cierta flexibilidad para adaptarse a la deformación del elemento durante la expansión térmica y evitar el agrietamiento causado por restricciones mecánicas. El tercer paso es la conexión del electrodo: utilice un soporte de electrodos especial para conectar firmemente el extremo conductor al cable de alimentación. El soporte debe presionarse, pero no excesivamente, para evitar que el componente se rompa. La superficie de conexión debe mantenerse limpia y, si es necesario, se puede utilizar pasta conductora de alta temperatura para mejorar la resistencia de contacto. Durante la instalación, el electrodo y el cable deben aislarse con materiales aislantes adecuados para evitar la descarga de arco. El cuarto paso es la inspección y el ajuste: una vez conectados todos los componentes, compruebe su altura de instalación, nivelación y paralelismo para garantizar que cada componente tenga una tensión uniforme y una disposición razonable. En particular, compruebe que el soporte sea simétrico y uniforme para evitar una distribución desigual de la corriente.

Paso 5, Prueba del sistema: Antes de encender el equipo, utilice un multímetro o un comprobador de aislamiento para comprobar si el valor de resistencia se encuentra dentro del rango normal. Tras encenderlo, realice una prueba de precalentamiento con baja tensión durante un breve periodo para observar si se produce un calentamiento anormal, chispas, ruidos, etc. Tras confirmar que todo funciona correctamente, aumente la temperatura gradualmente. Paso 6, Estabilidad térmica: Antes de la producción oficial, se recomienda realizar un ciclo completo de calentamiento, aislamiento y enfriamiento para verificar la estabilidad del funcionamiento de los componentes y la uniformidad de la distribución del calor. Si se detecta alguna anomalía, se debe detener la máquina inmediatamente para su inspección y evitar daños irreversibles en los componentes.

A través de pasos de instalación estandarizados, la tasa de fallas de los elementos de calentamiento de disiliciuro de molibdeno en la operación temprana se puede reducir de manera efectiva, asegurando su operación estable a largo plazo, extendiendo su vida útil y sentando una buena base para la operación segura y eficiente de equipos de alta temperatura.

6.3 Notas de instalación

Durante la instalación de los elementos calefactores de MoSi_2 , se debe prestar especial atención a una serie de detalles clave para evitar daños en el elemento, un funcionamiento anormal del horno o un funcionamiento inestable del sistema debido a errores de operación. En primer lugar, el elemento calefactor es un material cerámico frágil y debe manipularse con cuidado durante el transporte y la instalación. Está estrictamente prohibido golpearlo, doblarlo o impactarlo por la gravedad. En particular, al apretar la abrazadera del electrodo, no se debe aplicar un par excesivo para evitar que la concentración de tensión local provoque grietas en el elemento.

En segundo lugar, la superficie del componente debe mantenerse limpia, especialmente la parte calefactora. Está estrictamente prohibido el contacto con grasa, humedad o impurezas para evitar afectar

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

su comportamiento oxidativo a alta temperatura. Los operarios deben usar guantes aislantes limpios para garantizar que la superficie del componente no se contamine artificialmente durante todo el proceso de instalación.

Además, la conexión entre el electrodo y el alambre debe garantizar un buen contacto y una sujeción uniforme para evitar la ablación del extremo o temperaturas anormales debido a una resistencia de contacto excesiva. Asimismo, la separación entre los componentes debe ser uniforme para evitar sobrecargas y quemaduras en algunos componentes debido a un campo térmico desigual o una desviación de la corriente. Además, se debe prestar especial atención a la temperatura, la humedad y la limpieza del entorno de instalación. El interior del horno debe estar libre de polvo y agua. Si el ambiente es húmedo, debe secarse completamente para evitar averías o daños en el aislamiento causados por el vapor de agua durante el funcionamiento a alta temperatura.

6.4 Especificaciones de operación de seguridad

Para garantizar el funcionamiento seguro y estable del sistema de elementos calefactores MoSi_2 , los operadores deben cumplir estrictamente las siguientes normas de seguridad: Antes de encender el equipo, confirme que todo el cableado esté correcto, el aislamiento esté en buen estado y el sistema de control funcione correctamente. Use guantes, gafas protectoras y ropa de protección al operar el equipo. Está estrictamente prohibido tocar piezas a alta temperatura o estructuras bajo tensión con las manos descubiertas. El componente debe calentarse lentamente para evitar un choque térmico causado por un encendido repentino. Especialmente al usarlo por primera vez o al reiniciarlo tras un largo periodo de inactividad, se recomienda usar un método de calentamiento gradual para que el componente se adapte gradualmente al entorno térmico. Está estrictamente prohibido abrir la puerta del horno o tocar la superficie de los componentes sin autorización durante su funcionamiento. La inspección u observación debe realizarse después de desconectar la alimentación y dejar que se enfríe lo suficiente. Si se detecta alguna anomalía (como chispas, arcos eléctricos, ruidos anormales, enrojecimiento local, etc.), desconecte la alimentación y revísela inmediatamente. El funcionamiento forzado está estrictamente prohibido. Al reemplazar componentes o accesorios de electrodos, primero se debe cortar el suministro de energía principal y se debe confirmar que se libere el voltaje residual para garantizar que el entorno operativo esté en un estado completamente seguro. Revisar periódicamente si el cableado eléctrico está suelto, si las abrazaderas están viejas y si hay acumulación de carbón o polvo en el horno es una medida importante para garantizar un funcionamiento seguro a largo plazo.

6.5 Fallas comunes y guía de mantenimiento

Durante el uso, pueden ocurrir las siguientes fallas típicas en el elemento de calentamiento de disiliciuro de molibdeno, y el personal de mantenimiento debe tener capacidades básicas de juicio y procesamiento:

Quemadura del extremo : generalmente se manifiesta como fusión local o ennegrecimiento de la conexión del electrodo. Las posibles causas incluyen una resistencia de contacto excesiva, una descarga

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

de arco o cables sueltos. Compruebe si la abrazadera está bien presionada, si la superficie de contacto está limpia y reemplace las piezas quemadas según corresponda.

Grietas superficiales : Suelen deberse a choques térmicos o tensiones mecánicas. Las recomendaciones de mantenimiento incluyen ajustar la velocidad de calentamiento, optimizar la estructura de soporte e inspeccionar periódicamente los componentes para detectar microgrietas.

Calentamiento desigual : puede deberse a una separación desigual de los componentes, una distribución desigual de la potencia o una degradación del rendimiento de cada componente. Se debe reorganizar la zona de calentamiento y comprobar la resistencia de cada grupo de componentes.

Rotura de componentes : a menudo causada por manipulación inadecuada, fuerza de instalación desigual o sobrecarga prolongada. Se deben revisar los registros de operación para verificar si hay interferencias de fuerza externa y reemplazar los componentes nuevos.

Fallo de arranque : Si el sistema no se calienta correctamente, puede deberse a un fallo del circuito, un módulo de control de potencia anormal o un componente dañado. Revise la entrada de potencia, el contacto del electrodo y la salida de control uno por uno.

Para prolongar la vida útil de los componentes, se recomienda realizar una inspección de rutina semanal, que incluya verificar la firmeza de la conexión de los electrodos, la limpieza del horno y la normalidad del aumento de temperatura. En equipos con alta frecuencia de funcionamiento, se debe realizar un mantenimiento exhaustivo trimestral y registrar los parámetros de funcionamiento para analizar las tendencias a largo plazo.

6.5.1 Causas y soluciones de rotura del elemento calefactor

de disiliciuro de molibdeno (MoSi_2) son un modo de fallo común en operaciones a alta temperatura, lo que afecta directamente la estabilidad operativa y la eficiencia de producción del equipo. La fractura se debe principalmente a factores como la tensión térmica, la tensión mecánica, defectos del material y condiciones de funcionamiento inadecuadas. Como compuesto intermetálico, el MoSi_2 presenta una alta dureza pero una baja tenacidad a la fractura (aproximadamente $2-3 \text{ MPa} \cdot \text{m}^{1/2}$). Es fácil que se produzcan microfisuras y se expanda bajo tensiones complejas, lo que provoca la fractura. Analizar la causa de la fractura y adoptar soluciones específicas puede mejorar significativamente la vida útil del componente, lo que resulta adecuado para procesos de alta temperatura como la sinterización de cerámica y la fusión de vidrio.

Causas de fractura: Concentración de tensión térmica: El rápido aumento y caída de la temperatura causa un gradiente de temperatura excesivo en la zona de transición entre el extremo caliente y el extremo frío. La diferencia en el coeficiente de expansión térmica (aproximadamente $8,1 \times 10^{-6} \text{ K}^{-1}$) causa una alta tensión térmica e induce grietas. Los ciclos térmicos frecuentes agravan la propagación de microgrietas. Estrés mecánico: La instalación incorrecta o la vibración durante la operación causan concentración de tensión mecánica, especialmente en las curvas de los componentes en forma de U o W.

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

Defectos del material: La porosidad (densidad $<98\%$), las impurezas del límite de grano (como Fe, Al) o el tamaño de grano desigual durante el proceso de fabricación reducen la tenacidad a la fractura y las grietas son fáciles de propagar a lo largo de los defectos. Condiciones de funcionamiento inadecuadas: la densidad de potencia excesiva provoca un sobrecalentamiento local y permanecer en el rango de temperatura de "plaga" de 400 a 700 °C durante demasiado tiempo genera óxidos no protectores (como MoO_3), lo que debilita la resistencia del material.

Solución: Optimice la velocidad de calentamiento y enfriamiento: controle la velocidad de calentamiento y enfriamiento a 5-10 °C/min, pase rápidamente de 400 a 700 °C y reduzca la tensión térmica. Utilice una fuente de alimentación de control proporcional (voltaje de 20 a 100 V) para lograr una curva de temperatura suave y reducir la concentración de tensión en la zona de transición entre el extremo caliente y el extremo frío. Mejore el diseño de la instalación: utilice soportes de alúmina de alta pureza que coincidan con las características de MoSi_2 para reducir la tensión mecánica. Las abrazaderas están moderadamente apretadas para evitar un apriete excesivo o la vibración. Los componentes de tipo W son los preferidos para hornos grandes debido a su distribución de tensión más uniforme debido al diseño de extremos múltiples. Mejore la calidad del material: utilice sinterización por prensado en caliente (densidad $\geq 98\%$) y modificación por dopaje (como Y_2O_3 , 0,1-1 % en peso) para optimizar la resistencia del límite de grano, controlar el tamaño del grano y reducir los poros y las impurezas. El pulido de la superficie reduce los puntos de iniciación de grietas. Estandarice las condiciones de operación: mantenga una densidad de potencia de 15-20 W/cm², controle la atmósfera oxidante y evite ambientes con alta humedad o reductores que dañen la película de SiO_2 . Calibre periódicamente el termopar (precisión ± 1 °C) y el sistema de alimentación para evitar el sobrecalentamiento local. Recubrimiento superficial: Aplique un recubrimiento de SiC o Al_2O_3 para mejorar la resistencia al choque térmico y la solidez, y reducir la propagación de grietas. El recubrimiento CVD es más eficaz gracias a su alta adhesión (carga crítica de la prueba de rayado >3 kg).

Sugerencias de implementación : El análisis de fallas por fractura debe combinarse con el microscopio electrónico de barrido (MEB) (con un aumento de 50-200x) para observar la morfología de la grieta y el análisis de difracción de rayos X (DRX) de la composición de las fases para determinar la causa de la fractura. Registrar el número de ciclos térmicos y los cambios de potencia durante la operación para establecer un modelo de predicción de vida útil. Optimizar los parámetros de diseño y operación puede reducir el riesgo de fractura entre un 30 % y un 50 % y prolongar la vida útil de los componentes de MoSi_2 a más de 5000 horas.

6.5.2 Causas del desprendimiento de la capa de óxido y tratamiento de regeneración

La película protectora de SiO_2 de los elementos calefactores de MoSi_2 es clave para su protección antioxidante en atmósferas oxidantes. El desprendimiento provoca la exposición del sustrato, acelera la degradación por oxidación y acorta significativamente su vida útil. El desprendimiento de la capa de óxido se debe principalmente a estrés térmico, defectos del recubrimiento, el entorno operativo y el envejecimiento a largo plazo. La prueba y regeneración del problema del desprendimiento de la capa de

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

óxido puede restaurar eficazmente el rendimiento del componente y es adecuado para entornos oxidantes de alta temperatura, como la fabricación de semiconductores y la sinterización de cerámica.

Causas del desprendimiento: Impulso por estrés térmico: El aumento y descenso rápidos de temperatura o los ciclos térmicos frecuentes provocan la diferencia en los coeficientes de expansión térmica entre la película de SiO_2 y el sustrato de MoSi_2 , lo que produce un alto esfuerzo cortante, lo que provoca que la capa de película se agriete o se desprenda. Defectos del recubrimiento: El espesor desigual del recubrimiento superficial o la adhesión insuficiente (carga crítica de la prueba de rayado <2 kg) provocan desprendimiento local, destruyendo la integridad de la película de SiO_2 . Los defectos de fabricación (como poros o grietas) aumentan el riesgo de desprendimiento. Impacto del entorno operativo: La alta humedad ($>70\%$) o una atmósfera corrosiva provocan la hidratación o corrosión química de la película de SiO_2 , lo que reduce la adhesión. La oxidación de "plaga" a $400-700^\circ\text{C}$ genera MoO_3 no protector, destruyendo la estructura de la película. Envejecimiento a largo plazo: A 1800°C , cerca del límite de uso de MoSi_2 , el Si se volatiliza y hace que la película de SiO_2 se vuelva más delgada y la capa de película se agriete o se desprenda después de un funcionamiento a largo plazo.

Método de tratamiento de regeneración: Limpie la superficie: Tras detener el horno, utilice un cepillo suave o aire comprimido para eliminar los óxidos sueltos en la zona de desprendimiento. Si es necesario, lávela ligeramente con una solución ácida diluida (pH 4-5) y séquela bien para evitar residuos de sustancias corrosivas. Regeneración a alta temperatura: Ejecute a $1500-1600^\circ\text{C}$ en una atmósfera oxidante durante 2-4 horas para promover la regeneración de la película de SiO_2 . Pase rápidamente a $400-700^\circ\text{C}$ para evitar la oxidación por "plaga". Recubrimiento: Utilice pulverización de plasma o tecnología CVD para recubrir SiC o Al_2O_3 en zonas con desprendimiento severo para asegurar un espesor uniforme. El recubrimiento CVD es más adecuado para situaciones de alta demanda debido a su alta densidad. Optimice los parámetros de funcionamiento: reduzca la velocidad de calentamiento y enfriamiento a $5-10^\circ\text{C}/\text{min}$, controle la densidad de potencia a $15-20\text{ W}/\text{cm}^2$ y evite el sobrecalentamiento local. Utilice una fuente de alimentación de control proporcional y termopares precisos (precisión de $\pm 1^\circ\text{C}$) para mantener un campo térmico estable. Mejore el control ambiental: Mantenga una atmósfera oxidante en el horno y controle estrictamente la humedad y el contenido de gases corrosivos. Revise el sello del horno regularmente para evitar la entrada de humedad o contaminantes.

Sugerencias de implementación: Para el análisis de desprendimiento, se debe observar la morfología de la película mediante SEM y analizar la composición química mediante EDS para determinar el mecanismo de desprendimiento. Tras la regeneración, se deben medir la resistividad y la tasa de pérdida de masa (balanza de precisión, precisión $\pm 0,1\text{ mg}$) para verificar el efecto de recuperación de la película de SiO_2 .

6.5.3 Métodos de mantenimiento diario de los elementos calefactores

de MoSi_2 son clave para prolongar la vida útil, garantizar un funcionamiento estable y reducir los costes de mantenimiento. El mantenimiento se centra en preservar la integridad de la película de SiO_2 , prevenir

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

daños por tensión y mantener un entorno limpio en el horno, ideal para aplicaciones de alta temperatura como cerámica, vidrio y semiconductores. Los métodos de mantenimiento estandarizados pueden reducir el riesgo de fallos como fracturas, desprendimiento de la capa de óxido y deriva de resistividad.

Método de mantenimiento: Revise regularmente el estado de la superficie: Después de cada 500-1000 horas de operación, detenga el horno para revisar la superficie del elemento MoSi_2 (extremo caliente y extremo frío), y use un microscopio óptico para observar la integridad de la película de SiO_2 , grietas o signos de desprendimiento. Cepille suavemente para eliminar el polvo suelto y registre las áreas anormales para evaluar la vida útil. Limpie el horno: Limpie el horno mensualmente o después de cada 100 ciclos térmicos, usando aire comprimido o un cepillo suave para eliminar óxidos, impurezas metálicas (como Fe_2O_3) o depósitos volátiles (como compuestos de metales alcalinos) para prevenir la contaminación de la película de SiO_2 o corrosión. Controle las condiciones de operación: Mantenga una atmósfera oxidante y supere rápidamente 400-700 °C para evitar la oxidación "plaga". Monitoree la densidad de potencia y la temperatura del extremo frío para prevenir el sobrecalentamiento o la deriva de resistividad. Español: Revisar las conexiones eléctricas: Revisar la abrazadera y la conexión de alimentación cada 1000 horas, eliminar los depósitos de óxido o carburo y asegurar un buen contacto. Calibrar la fuente de alimentación de control proporcional y el termopar (precisión ± 1 °C) para evitar fluctuaciones de voltaje o desviaciones del control de temperatura. Mantener el soporte y la instalación: Revisar el soporte de alúmina de alta pureza para asegurar que no haya grietas ni deformaciones y mantenerlo en consonancia con la expansión térmica de MoSi_2 . Ajustar la tensión de la abrazadera para evitar la concentración de tensión mecánica y lubricar los conectores regularmente (utilizar lubricante de alta temperatura). Registrar los datos de operación: Establecer un registro de operación para registrar el número de ciclos térmicos, curvas de temperatura, densidad de potencia y cambios de resistividad (medidos mediante el método de cuatro sondas). Predecir la vida útil mediante análisis de datos (como el modelo Weibull) y sustituir los componentes envejecidos con antelación. Protección del recubrimiento de la superficie: Si se utiliza un recubrimiento de SiC o Al_2O_3 , comprobar la integridad del recubrimiento regularmente y aplicar una nueva capa (CVD o pulverización de plasma) si es necesario. Evite que los rayones mecánicos o la corrosión química (como los limpiadores ácidos) dañen el revestimiento.

Sugerencias de implementación : Desarrolle un plan de mantenimiento y capacite a los operadores para implementarlo de manera estandarizada. Utilice SEM y EDS para analizar muestras defectuosas y optimizar las estrategias de mantenimiento. Controle estrictamente la atmósfera y la limpieza del horno, y optimice la disposición de los componentes junto con la simulación de campo térmico para reducir los costos de mantenimiento entre un 20 % y un 30 % y garantizar que los componentes de MoSi_2 funcionen de forma estable durante más de 5000 horas a 1500 °C. Preste atención a la seguridad durante el mantenimiento. Después de detener el horno, espere a que la temperatura baje a la temperatura ambiente y desconecte la alimentación para evitar descargas eléctricas o quemaduras.

6.5.4 Tecnología de sustitución y reciclaje de elementos calefactores

El reemplazo de los elementos calefactores es fundamental para garantizar el funcionamiento estable del sistema de calefacción MoSi_2 . Con el aumento del tiempo de uso, los elementos se degradan o incluso

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

se rompen debido a factores como la fatiga térmica, la oxidación o daños mecánicos. Deben reemplazarse a tiempo para evitar fallos en el equipo e interrupciones de la producción. Durante el proceso de reemplazo, se deben seguir estrictamente los procedimientos operativos para garantizar la seguridad y la calidad de la instalación.

Antes de reemplazarlo, desconecte la alimentación del horno y espere a que los componentes se enfríen a una temperatura segura para evitar quemaduras y daños secundarios causados por tensión térmica. Evite tirones y golpes fuertes durante el desmontaje, y separe con cuidado los componentes y las fijaciones de los electrodos para evitar daños a la estructura circundante. Los componentes viejos desmontados deben clasificarse y almacenarse para su posterior reciclaje y reutilización.

La tecnología de reciclaje y reutilización es fundamental en la aplicación de elementos calefactores de disiliciuro de molibdeno. Los materiales de disiliciuro de molibdeno son, en sí mismos, de gran valor. El reciclaje no solo ahorra costos, sino que también se ajusta al concepto de protección ambiental. Los procesos de reciclaje comunes incluyen la recolección de componentes usados, la trituración mecánica, el tratamiento químico y la purificación del material. Al eliminar la capa de óxido y las impurezas, se extraen elementos de molibdeno y silicio de alta pureza para la preparación de nuevos elementos calefactores u otros materiales a base de molibdeno.

Además, algunos componentes ligeramente oxidados y sin daños pueden seguir utilizándose tras la limpieza de la superficie y la regeneración de la capa de óxido, lo que prolonga su vida útil. Las tecnologías avanzadas de reciclaje también incluyen la reducción al vacío, el prensado isostático en caliente y otros procesos para maximizar la restauración de las propiedades del material. Las empresas deben establecer un sistema de reciclaje completo, equipado con equipos y técnicos especializados para garantizar un proceso de reciclaje seguro y eficiente.

6.6 Métodos típicos de instalación en hornos industriales

Existen diversas maneras de instalar elementos calefactores de MoSi_2 en hornos industriales. Generalmente, se diseñan según la estructura del horno, los requisitos del proceso y las especificaciones del elemento, buscando lograr un calentamiento uniforme, alta eficiencia y fácil mantenimiento. A continuación, se presentan varios métodos de instalación típicos:

Instalación suspendida : Este tipo de instalación es común en hornos de protección atmosférica y hornos de vacío. El elemento calefactor se suspende en la parte superior o a ambos lados del horno y se fija mediante soportes aislantes para garantizar su libre expansión y evitar el contacto con la pared del horno u otros elementos. Este método facilita la sustitución y el mantenimiento de elementos, y es adecuado para condiciones de trabajo que requieren una sustitución rápida de los mismos.

Instalación empotrada : El elemento calefactor se empotra directamente en el material refractario del horno o en el soporte cerámico para formar una estructura de soporte estable. Este método es estable y menos susceptible a impactos mecánicos, y es adecuado para hornos industriales que operan

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

continuamente a altas temperaturas. La desventaja es que su reemplazo es más complicado y requiere el desmontaje de parte del material refractario.

Instalación fija con soporte : Utilice soportes especiales de metal o cerámica para fijar los elementos calefactores en diferentes posiciones del horno, como la parte inferior, la pared lateral o la parte superior. El diseño del soporte debe tener en cuenta la expansión térmica y el rendimiento del aislamiento para garantizar que los elementos reciban una tensión uniforme. Este método es adecuado para hornos industriales de mayor tamaño y permite lograr una disposición precisa y optimizar la distribución del campo térmico.

Instalación plana : Coloque los componentes sobre la superficie de calentamiento, como una placa o plataforma calefactora, comúnmente utilizada en hornos planos y hornos de recocido. Esta instalación proporciona una distribución uniforme del calor, pero requiere que los componentes estén bien planos y bien sujetos para evitar que se doblen y deformen.

Instalación en serpentin : Los elementos calefactores están dispuestos en espiral o en espiral, lo que resulta adecuado para hornos cilíndricos o verticales. Este método permite ahorrar espacio, aumentar la superficie de calentamiento y facilitar el ajuste de la densidad de potencia.

En aplicaciones prácticas, se suelen combinar múltiples métodos de instalación para satisfacer las necesidades de procesos complejos. El diseño debe considerar plenamente las características de expansión térmica de los componentes, los requisitos de aislamiento eléctrico, la facilidad de instalación y desmontaje, y factores ambientales como el tipo de atmósfera y el gradiente de temperatura. Además, durante la instalación, asegúrese de que el elemento calefactor esté firmemente conectado a la fuente de alimentación y bien aislado para evitar fugas y sobrecalentamiento local. Revise periódicamente el estado de la instalación y ajuste los soportes y abrazaderas a tiempo para garantizar que el campo térmico en el horno sea uniforme y estable, mejorando así la eficiencia de calentamiento y la vida útil del elemento.



CTIA GROUP LTD Varilla de silicato de molibdeno

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

Capítulo 7 Normas de prueba y certificación de elementos calefactores de MoSi₂

7.1 Método de prueba del rendimiento del elemento calefactor

de MoSi₂ son fundamentales para garantizar su calidad y fiabilidad, abarcando la determinación de múltiples indicadores clave, como las propiedades eléctricas, mecánicas, térmicas y la durabilidad. En primer lugar, la prueba de rendimiento eléctrico consiste principalmente en la determinación del valor de resistencia y el coeficiente de temperatura del elemento. Mediante instrumentos de medición de resistencia de precisión, se comprueba la variación de la resistencia del elemento en diferentes entornos de temperatura para evaluar la estabilidad y la consistencia de su rendimiento eléctrico. La uniformidad y la variación lineal de la resistencia son cruciales para el diseño y el uso de elementos calefactores.

Las pruebas de propiedades mecánicas incluyen principalmente ensayos de dureza y de flexión. Los ensayos de dureza suelen utilizar durómetros Vickers o Rockwell para medir la variación de dureza de los componentes en condiciones de calentamiento y enfriamiento, lo que refleja la resistencia mecánica y la resistencia al desgaste del material. El ensayo de flexión aplica una tensión mecánica para observar la capacidad de deformación elástica y el punto de rotura del componente, evaluando así su capacidad de resistir daños mecánicos.

Las pruebas de rendimiento térmico incluyen la determinación del coeficiente de expansión térmica y la prueba de estabilidad térmica. La prueba del coeficiente de expansión térmica utiliza un instrumento de expansión térmica para medir la variación de longitud del componente durante el proceso de calentamiento, garantizando así que se reserve suficiente espacio de expansión térmica durante el diseño para evitar daños causados por la tensión térmica. La prueba de estabilidad térmica utiliza un experimento de calentamiento continuo a alta temperatura para observar la resistencia, la morfología y los cambios estructurales del componente y evaluar su estabilidad a largo plazo en un entorno de alta temperatura.

Además, las pruebas de resistencia a la oxidación son un indicador importante para evaluar la vida útil de los elementos calefactores de MoSi₂. Mediante experimentos de calentamiento a largo plazo en un entorno de oxidación simulado, se detecta la formación, el espesor y el desprendimiento de la película de óxido para determinar la resistencia a la oxidación del elemento. El análisis de modos de fallo combina el análisis de fracturas y las pruebas de microestructura para ayudar a identificar posibles debilidades y mecanismos de fallo de los elementos calefactores.

Estos métodos de prueba se complementan entre sí y reflejan de manera integral el nivel de rendimiento de los elementos de calentamiento de disilicuro de molibdeno, proporcionando una base científica y una garantía técnica para la producción y la aplicación.

7.2 Análisis de normas ISO, ASTM y otras

La Organización Internacional de Normalización (ISO) y la Sociedad Estadounidense para Pruebas y Materiales (ASTM) han desarrollado una serie de normas para elementos calefactores y materiales

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

relacionados, que cubren aspectos como la calidad del producto, los métodos de prueba y las normas de seguridad, que desempeñan un papel clave para garantizar la calidad y el rendimiento de los elementos calefactores MoSi₂.

En cuanto a las normas ISO, las principales normas relacionadas con los elementos calefactores de MoSi₂ incluyen el análisis de la composición del material, la tolerancia dimensional, las pruebas de propiedades mecánicas y las pruebas de adaptabilidad ambiental. Por ejemplo, la norma ISO 9001 sobre sistemas de gestión de calidad garantiza la mejora sistemática y continua del control de calidad durante el proceso de producción. La serie ISO 22007 incluye métodos de ensayo de expansión térmica para materiales, lo que proporciona una referencia para el diseño y el uso. Las normas ISO para cerámicas electrónicas y materiales resistentes a altas temperaturas abarcan la evaluación de las propiedades eléctricas y térmicas.

Las normas ASTM tienen una larga trayectoria y se utilizan ampliamente en el campo de las pruebas de materiales. La norma ASTM E1131 especifica un procedimiento general para el análisis térmico de materiales, adecuado para determinar la estabilidad térmica y el comportamiento de cambio de fase de los componentes de MoSi₂. La norma ASTM E384 abarca los métodos de ensayo de microdureza y se utiliza ampliamente para la evaluación de la dureza. La norma ASTM E1820 proporciona directrices para las pruebas de tenacidad a la fractura, lo que ayuda a analizar el comportamiento de fractura de los componentes. También existen normas como la ASTM B193 para la medición de la resistividad de materiales metálicos, lo que garantiza la precisión de las pruebas de rendimiento eléctrico. Además, tanto ISO como ASTM cuentan con directrices correspondientes para las especificaciones de seguridad y los requisitos de rendimiento de los elementos calefactores de hornos industriales, como la norma de seguridad eléctrica IEC 60519, que abarca la seguridad del diseño y la operación de equipos de calentamiento eléctrico de alta temperatura. Estas normas son de gran importancia para que los fabricantes diseñen elementos calefactores de MoSi₂ que cumplan con los requisitos del mercado internacional.

En aplicaciones prácticas, las empresas suelen combinar las normas ISO y ASTM para desarrollar procesos de prueba internos que garanticen que los productos cumplan con las normas internacionales y las necesidades específicas del cliente. La calibración de los equipos de prueba y la certificación de la cualificación de los operadores también suelen realizarse de acuerdo con las normas pertinentes para mejorar la fiabilidad y la autoridad de los resultados de las pruebas.

7.3 Prueba de adaptabilidad ambiental

Las pruebas de adaptabilidad ambiental son clave para evaluar la estabilidad de los elementos calefactores de disiliciuro de molibdeno en diversos entornos de trabajo. Este tipo de prueba simula principalmente el rendimiento de los elementos calefactores en diferentes condiciones, como temperatura, humedad, composición atmosférica y vibración mecánica. En primer lugar, la prueba de ciclo de alta temperatura detecta la influencia de la tensión térmica causada por la expansión y contracción térmica del elemento en la estructura y el rendimiento del material mediante calentamiento y enfriamiento repetidos, y verifica su resistencia a la fatiga térmica. La prueba de ambiente húmedo simula el uso en

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

condiciones de alta humedad, observa la estabilidad de la capa de óxido en la superficie del elemento y si sus propiedades eléctricas se ven afectadas, garantizando así que el elemento calefactor no presente fallas de aislamiento ni corrosión en un ambiente húmedo. Además, la prueba de adaptabilidad atmosférica se centra en simular el comportamiento del elemento calefactor en una atmósfera oxidante, reductora o inerte. Mediante el control de la composición atmosférica en el horno, se examinan la tasa de oxidación y el rendimiento antioxidante del elemento calefactor en diferentes atmósferas para garantizar su larga vida útil en condiciones de trabajo complejas. La prueba de vibración mecánica e impacto verifica si el elemento y su estructura de montaje pueden resistir daños mecánicos causados por la vibración durante el transporte y la operación.

Las pruebas de adaptabilidad ambiental pueden reflejar completamente la confiabilidad de los elementos de calentamiento en aplicaciones reales, proporcionar una base científica para la selección, el diseño y el mantenimiento de materiales y reducir el riesgo de fallas causadas por factores ambientales.

7.4 Modos de falla y métodos de predicción de vida útil

El análisis de modos de fallo es fundamental para comprender el mecanismo de daño de los elementos calefactores de MoSi_2 y prolongar su vida útil. Entre los modos de fallo más comunes se incluyen el agrietamiento por fatiga térmica, el desprendimiento de la capa de óxido, la fractura por tensión mecánica y la ablación local. Mediante la observación macroscópica y el análisis microestructural de los componentes averiados, se puede determinar la posición inicial y la trayectoria de expansión de las grietas, así como evaluar los cambios en el material antes del fallo, como la presencia de granos gruesos, el aumento de poros y un espesor anormal de la capa de óxido.

La predicción de la vida útil suele utilizar pruebas de vida acelerada combinadas con modelos teóricos. Las pruebas aceleradas replican rápidamente el proceso de daño que los componentes pueden experimentar durante el uso a largo plazo al aumentar la temperatura de operación, el número de ciclos térmicos o la carga mecánica, y recopilan datos de fallas. Con estos datos, combinados con teorías relevantes de mecánica de fracturas, termodinámica y ciencia de los materiales, se establece un modelo matemático para predecir la vida útil de los elementos calefactores en condiciones normales de operación. Los modelos más utilizados incluyen el modelo de activación térmica de Arrhenius y el modelo de fatiga de Coffin-Manson. Además, el análisis estadístico basado en datos de fallas, como la distribución de Weibull, ayuda a evaluar la confiabilidad y las características de distribución de la vida útil del producto. Mediante la predicción de la vida útil, los fabricantes pueden optimizar el diseño de los componentes y la selección de materiales, a la vez que brindan a los usuarios recomendaciones razonables de mantenimiento y ciclos de reemplazo para reducir las tasas de fallas y los costos operativos.

7.5 Requisitos del código de seguridad y eléctrico

Las especificaciones eléctricas y de seguridad son fundamentales para garantizar el funcionamiento seguro y estable de los elementos calefactores de MoSi_2 y sus sistemas. La temperatura de funcionamiento del elemento calefactor es extremadamente alta y requiere una alta corriente de conmutación. Es

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

fundamental cumplir estrictamente las normas de seguridad eléctrica pertinentes para evitar accidentes como descargas eléctricas, cortocircuitos e incendios. Generalmente, se requiere que la resistencia de aislamiento del elemento calefactor alcance el valor especificado, y su estado de aislamiento se comprueba periódicamente durante el uso para evitar fugas causadas por el envejecimiento del aislamiento.

La conexión eléctrica debe utilizar terminales, materiales aislantes y procesos de conexión que cumplan con las normas nacionales o internacionales para garantizar un buen contacto y suficiente resistencia mecánica y térmica. El sistema de puesta a tierra debe diseñarse de forma razonable para reducir eficazmente el riesgo de descarga eléctrica. El sistema de alimentación debe estar equipado con dispositivos de protección contra sobrecargas, fugas y cortocircuitos para interrumpir el suministro eléctrico a tiempo en circunstancias anormales y garantizar la seguridad del personal y del equipo. Además, el personal de instalación y mantenimiento debe cumplir con los procedimientos operativos de seguridad y estar equipado con el equipo de protección necesario. Se deben instalar señales de advertencia e instalaciones de aislamiento en las zonas de trabajo con altas temperaturas para evitar el contacto accidental y las quemaduras. Las certificaciones de seguridad de los equipos y componentes relacionados, como la certificación CE y la certificación UL, también facilitan el acceso al mercado y la garantía de seguridad.



CTIA GROUP LTD Varilla de silicato de molibdeno

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

Capítulo 8 Aplicación de elementos calefactores de MoSi₂

8.1 Aplicación de elementos calefactores de MoSi₂ en la industria metalúrgica

de disiliciuro de molibdeno (MoSi₂) se utilizan ampliamente en la fundición de metales, el tratamiento térmico y los procesos de sinterización a alta temperatura en la industria metalúrgica gracias a su excelente rendimiento a alta temperatura, buena resistencia a la oxidación y características electrotérmicas estables. La conductividad térmica, el coeficiente de expansión térmica y la resistividad con coeficiente de temperatura positivo del MoSi₂ le permiten proporcionar un calentamiento eficiente y uniforme, satisfaciendo las necesidades de la industria metalúrgica de alta temperatura, control preciso de la temperatura y larga vida útil. Los elementos MoSi₂ logran una excelente resistencia a la oxidación gracias a la película protectora de SiO₂ que se forma en la superficie en una atmósfera oxidante, lo que resulta adecuado para el funcionamiento a largo plazo de hornos metalúrgicos. Las estructuras comunes de elementos MoSi₂ (como tipo U, tipo W, Φ6/12 o Φ9/18) se pueden personalizar según el tipo de horno y los requisitos del proceso, y se utilizan ampliamente en hornos de fundición de metales, hornos de tratamiento térmico y hornos de sinterización. La optimización de la aplicación de los componentes MoSi₂ debe evitar el rango de temperatura "plaga" de 400-700 °C, aumentar y disminuir rápidamente la temperatura para reducir la generación de óxidos no protectores (una mezcla de MoO₃ y SiO₂) y combinar recubrimientos de superficie (como SiC o Al₂O₃) para mejorar la resistencia al choque térmico y la vida útil.

En la industria metalúrgica, las ventajas de los elementos calefactores de MoSi₂ incluyen alta densidad de potencia, control estable de la temperatura y larga vida útil. Su flexibilidad de diseño permite su uso en diversos tipos de hornos, como hornos de caja, hornos de túnel y hornos de vacío, para satisfacer las necesidades de procesamiento de diferentes materiales metálicos. Se requieren soportes de alúmina de alta pureza para su instalación, a fin de adaptarse a las características de expansión térmica del MoSi₂ y reducir la tensión mecánica. Las conexiones eléctricas requieren el uso de abrazaderas de baja resistencia y fuentes de alimentación de control proporcional para garantizar la estabilidad operativa. La aplicación de elementos de MoSi₂ también requiere considerar el control de la atmósfera para evitar entornos de reducción o alta humedad que provoquen fallas en la película de SiO₂ .

8.1.1 Fundición de metales y tratamiento térmico

de MoSi₂ en la fundición y el tratamiento térmico de metales se concentran principalmente en hornos de fundición de alta temperatura, hornos de recocido y hornos de temple, y se utilizan para procesar materiales metálicos como aluminio, cobre, acero y aleaciones de titanio. La fundición de metales requiere un control preciso de la temperatura del horno entre 1000 y 1600 °C. La resistividad con coeficiente de temperatura positivo de los elementos de MoSi₂ les permite ajustar la potencia de forma adaptativa y proporcionar un entorno estable a alta temperatura. Los elementos de MoSi₂ de tipo U y tipo W se utilizan comúnmente en hornos de fundición pequeños y medianos, con una longitud de extremo caliente de 100 a 500 mm y una densidad de potencia de 15 a 20 W/cm². Pueden alcanzar rápidamente el punto de fusión (como 660 °C para el aluminio y 1085 °C para el cobre) y mantener un campo de

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

temperatura uniforme. En procesos de tratamiento térmico como el recocido y el temple, los elementos de MoSi₂ proporcionan un calentamiento estable a 1200-1500 °C, lo que garantiza el refinamiento del grano metálico y la optimización del rendimiento. Por ejemplo, el recocido del acero requiere mantenerlo a 1200-1300 °C, y la conductividad térmica y la resistencia al choque térmico de los componentes de MoSi₂ favorecen un calentamiento y ciclos térmicos rápidos.

MoSi₂ utilizados en la fundición de metales y el tratamiento térmico ofrecen una alta resistencia a la oxidación y una larga vida útil. En atmósferas oxidantes, la película protectora de SiO₂ previene eficazmente la degradación del material, y la tasa de pérdida de masa a 1500 °C es inferior a 0,2 mg/cm²/1000 h. El recubrimiento superficial mejora aún más la resistencia al choque térmico y a la corrosión, y es adecuado para atmósferas metalúrgicas con trazas de azufre o carbono. Una vez instalados, los elementos tipo U se suspenden verticalmente, los elementos tipo W son adecuados para el calentamiento uniforme de hornos grandes, y el extremo frío se refuerza con un recubrimiento aluminizado. Durante el funcionamiento, es necesario evitar el paso rápido a temperaturas de 400-700 °C para prevenir la oxidación por plagas, y la velocidad de calentamiento y enfriamiento se controla a 5-10 °C/min. El mantenimiento incluye la inspección regular de la integridad de la película de SiO₂ y del estado de la conexión del extremo frío, así como la limpieza de impurezas del horno (como óxido de hierro) para evitar la contaminación. La limitación de los elementos MoSi₂ radica en que la temperatura de operación debe reducirse en un entorno reductor o de vacío para evitar la falla de la película de SiO₂. En aplicaciones prácticas, la optimización de la disposición de los componentes, combinada con la simulación del campo térmico, puede mejorar significativamente la eficiencia y la calidad de la fundición de metales y el tratamiento térmico.

8.1.2 Proceso de sinterización a alta temperatura

de MoSi₂ en procesos de sinterización a alta temperatura se utilizan principalmente para la sinterización de pulvimetalurgia, compuestos cerámicos y aleaciones especiales, y se utilizan comúnmente en la producción de aceros de alto rendimiento, aleaciones de titanio y carburos cementados. El proceso de sinterización requiere un control preciso de la temperatura entre 1300 y 1800 °C para promover la densificación del material y el crecimiento del grano. La alta densidad de potencia y el control estable de la temperatura de los elementos de MoSi₂ los convierten en la opción ideal. Los elementos de MoSi₂ de tipo W y de varilla recta se utilizan a menudo en hornos de sinterización de gran tamaño para proporcionar un campo térmico uniforme y son adecuados para piezas de gran tamaño. Los elementos espirales (diámetro del extremo caliente: 4-9 mm) son adecuados para hornos tubulares pequeños para satisfacer las necesidades de sinterización de alta precisión. La conductividad térmica y la resistividad con coeficiente de temperatura positivo del MoSi₂ garantizan una distribución uniforme del calor durante la sinterización y reducen la deformación y las grietas en la pieza.

En la sinterización a alta temperatura, la resistencia a la oxidación de los elementos MoSi₂ es una ventaja clave. La película protectora de SiO₂ permanece estable a 1500-1800 °C (espesor 10-15 μm), con una tasa de pérdida de masa de <0,5 mg/cm²/1000 h, lo que favorece el funcionamiento a largo plazo. La modificación con dopaje (como Y₂O₃, 0,1-1 % en peso) mejora la resistencia del límite de grano, y el

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

recubrimiento superficial (como Al_2O_3 , espesor 10-50 μm) mejora la resistencia al choque térmico y a la corrosión, lo que resulta adecuado para atmósferas de sinterización que contienen trazas de impurezas volátiles. Una vez instalados, los elementos tipo W se soportan horizontalmente o se suspenden verticalmente, y los soportes de alúmina de alta pureza reducen la tensión térmica. Se utilizan abrazaderas de cobre para las conexiones eléctricas y fuentes de alimentación de control proporcional para garantizar la estabilidad. Durante el funcionamiento, la temperatura debe pasar rápidamente de 400 a 700 °C para evitar la formación de óxidos no protectores, y la velocidad de calentamiento y enfriamiento debe ser de 5 a 10 °C/min para reducir el estrés térmico (la tenacidad a la fractura de MoSi_2 es de aproximadamente 2-3 $\text{MPa}\cdot\text{m}^{1/2}$).

de MoSi_2 en la sinterización a alta temperatura presentan sensibilidad atmosférica y requisitos de mantenimiento. Las atmósferas de sinterización que contienen azufre o carbono pueden corroer la película de SiO_2 , por lo que la presión parcial de oxígeno y la humedad deben controlarse estrictamente. La inspección regular de la superficie del componente (observación SEM de la capa de película) y la temperatura del extremo frío, así como la limpieza de impurezas del horno (como óxidos metálicos), pueden prolongar su vida útil. La optimización del campo térmico (como la simulación de elementos finitos) garantiza la uniformidad de la temperatura y reduce los defectos en las piezas sinterizadas. El alto rendimiento de los componentes de MoSi_2 los hace ampliamente utilizados en la producción de componentes aeroespaciales, herramientas de corte y materiales resistentes al desgaste en procesos de sinterización a alta temperatura para mejorar la calidad del producto y la eficiencia de la producción.

8.1.3 Equipos de tratamiento térmico

de MoSi_2 se utilizan ampliamente en equipos de tratamiento térmico de la industria metalúrgica, como hornos de recocido, de temple, de normalización y de revenido, para mejorar las propiedades mecánicas, la resistencia a la corrosión y las propiedades de procesamiento de los materiales metálicos. Los equipos de tratamiento térmico requieren un control preciso de la temperatura y un campo térmico uniforme para optimizar la estructura del grano metálico y el alivio de tensiones. La resistividad con coeficiente de temperatura positivo de los elementos de MoSi_2 les permite proporcionar un calentamiento estable en el rango de 1200 a 1500 °C, ideal para procesar materiales como acero, aleaciones de aluminio, de cobre y de titanio. Los elementos de MoSi_2 en forma de U son adecuados para hornos pequeños de tratamiento térmico con una longitud de extremo caliente de 100 a 500 mm, proporcionando un calentamiento centralizado y adecuados para la producción de lotes pequeños. Los elementos en forma de W y de varilla recta son adecuados para hornos grandes de tratamiento térmico continuo con una longitud de extremo caliente de 200 a 1000 mm, que pueden cubrir una amplia área de calentamiento y garantizar la uniformidad de la temperatura.

MoSi_2 en equipos de tratamiento térmico se caracterizan por su alta resistencia a la oxidación y su capacidad para soportar ciclos térmicos frecuentes. En atmósferas oxidantes, la película protectora de SiO_2 garantiza la estabilidad a largo plazo del elemento, lo que facilita la conservación del calor a largo plazo y la rápida subida y bajada de temperatura durante el proceso de tratamiento térmico. Los recubrimientos superficiales (como SiC o Al_2O_3) mejoran la resistencia al choque térmico y a la

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

corrosión, y son adecuados para atmósferas metalúrgicas complejas. Durante la instalación, el elemento se fija mediante un soporte de alúmina de alta pureza, y la suspensión vertical u horizontal reduce la tensión mecánica. La conexión eléctrica utiliza una abrazadera de baja resistencia, y la fuente de alimentación de control proporcional garantiza un control preciso de la temperatura. Durante el funcionamiento, es necesario superar rápidamente los 400-700 °C para evitar la oxidación por plaga, y la velocidad de subida y bajada de temperatura se controla a 5-10 °C/min. El mantenimiento incluye la inspección regular de la película de SiO₂, la conexión del extremo frío y la limpieza del horno para evitar la contaminación por impurezas. La limitación de los elementos MoSi₂ radica en que la temperatura de uso debe reducirse en una atmósfera reductora y la atmósfera del horno debe controlarse estrictamente. La optimización del campo térmico y el mantenimiento regular garantizan la alta eficiencia y la calidad del producto de los equipos de tratamiento térmico, ampliamente utilizados en los sectores automotriz, aeroespacial y de fabricación de maquinaria.

8.2 Aplicación de elementos calefactores MoSi₂ en la industria cerámica

de MoSi₂ se utilizan ampliamente en la cocción de cerámica, el tratamiento de esmaltado y la preparación de materiales cerámicos especiales en la industria cerámica. Su alta temperatura de funcionamiento, resistencia a la oxidación y estabilidad electrotérmica satisfacen las necesidades de los procesos cerámicos para un control preciso de la temperatura. Los elementos de MoSi₂ mantienen la estabilidad en atmósfera oxidante mediante una película protectora superficial de SiO₂ y son adecuados para hornos de cocción de cerámica, hornos de cocción de esmaltado y hornos especiales de sinterización de cerámica. Los elementos de MoSi₂ en forma de U, en forma de W y en espiral se personalizan según el tipo de horno. El de forma de U es adecuado para hornos de caja pequeños, el de forma de W para hornos de túnel grandes y el de tipo espiral para la sinterización de alta precisión en hornos tubulares. Se utilizan soportes de alúmina de alta pureza para la instalación, abrazaderas de baja resistencia para las conexiones eléctricas y un control preciso de la temperatura se logra mediante una fuente de alimentación de control proporcional. La operación requiere alcanzar rápidamente entre 400 y 700 °C para evitar la oxidación por plagas. La velocidad de calentamiento y enfriamiento es de 5 a 10 °C/min, y el recubrimiento superficial mejora la resistencia al choque térmico y la vida útil. La aplicación de elementos MoSi₂ en la industria cerámica mejora significativamente la calidad de cocción y la eficiencia de producción, satisfaciendo así las necesidades de la cerámica tradicional y la cerámica avanzada.

8.2.1 Cocción y esmaltado de cerámica

de MoSi₂ se utilizan en hornos de caja, hornos de lanzadera y hornos de túnel para la cocción de cerámica y el tratamiento de esmaltado, y se emplean para producir cerámica de uso diario, cerámica arquitectónica y cerámica artística. La cocción de cerámica requiere la sinterización de la pasta verde y la fusión del esmalte a 1000-1400 °C. La resistividad con coeficiente de temperatura positivo de los elementos de MoSi₂ proporciona un entorno estable a alta temperatura que garantiza la densificación de las pastas verdes y el brillo de los esmaltes. Los elementos de MoSi₂ en forma de U son adecuados para hornos pequeños, mientras que los elementos en forma de W son adecuados para hornos grandes de cocción continua, proporcionando un campo térmico uniforme que reduce el agrietamiento y la deformación de

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

la cerámica. El tratamiento de esmaltado requiere un control preciso de la temperatura para controlar la fusión y la cristalización del esmalte. La conductividad térmica de los elementos de MoSi_2 favorece un calentamiento rápido y un aislamiento térmico óptimo. La película protectora de SiO_2 permanece estable en atmósferas oxidantes, y el recubrimiento superficial mejora la resistencia al choque térmico y a la corrosión, lo que resulta adecuado para atmósferas de cocción con esmaltes volátiles. La instalación y el funcionamiento requieren el control de la atmósfera y las velocidades de calentamiento y enfriamiento, y el mantenimiento incluye la inspección periódica de la superficie del componente y la limpieza del horno. Los componentes de MoSi_2 mejoran la eficiencia y la calidad del producto en los procesos de cocción y esmaltado de cerámica y se utilizan ampliamente en la producción cerámica.

8.2.2 Preparación de materiales cerámicos especiales

de MoSi_2 se utilizan en hornos de sinterización y de prensado en caliente para la preparación de materiales cerámicos especiales. Se emplean para producir cerámicas avanzadas como alúmina, zirconio, nitruro de silicio y carburo de silicio, y son ampliamente utilizados en los sectores aeroespacial, electrónico y médico. La sinterización de cerámicas especiales requiere una temperatura de 1400-1800 °C para lograr una alta densidad y un rendimiento excelente. La alta densidad de potencia y la precisa capacidad de control de temperatura de los elementos de MoSi_2 cumplen estos requisitos. Los elementos de MoSi_2 de tipo W y espiral son adecuados para hornos de sinterización grandes y pequeños, proporcionando un campo térmico uniforme y reduciendo los defectos del material. La película protectora y el recubrimiento superficial de SiO_2 garantizan la estabilidad de los elementos en atmósferas oxidantes de alta temperatura, y la modificación por dopaje mejora la resistencia al choque térmico y es adecuada para ciclos térmicos frecuentes. Se utilizan soportes de alúmina de alta pureza para la instalación, las conexiones eléctricas garantizan un contacto de baja resistencia, y la atmósfera, así como las velocidades de calentamiento y enfriamiento, se controlan para evitar la oxidación por plagas. El mantenimiento incluye la inspección regular de los componentes y el estado del horno para garantizar la fiabilidad a largo plazo.

8.3 Aplicación de elementos calefactores MoSi_2 en la industria fotovoltaica

de disiliciuro de molibdeno (MoSi_2) se utilizan ampliamente en la industria fotovoltaica para la fabricación de obleas de silicio y equipos de producción de células solares debido a su rendimiento a altas temperaturas, resistencia a la oxidación y estabilidad electrotérmica. Los elementos MoSi_2 pueden proporcionar un control preciso de la temperatura y un campo térmico uniforme, cumpliendo con los requisitos de alta temperatura y ambiente limpio de los procesos fotovoltaicos. Consiguen resistencia a la oxidación mediante la película protectora de SiO_2 formada en la superficie en una atmósfera oxidante, lo que es adecuado para un funcionamiento a largo plazo. Los elementos MoSi_2 en forma de U, en forma de W y de varilla recta se personalizan según el tipo de horno. El tipo en forma de U es adecuado para hornos pequeños, y el tipo en forma de W y de varilla recta son adecuados para equipos continuos de gran tamaño. Se utilizan soportes de alúmina de alta pureza para la instalación para que coincidan con las características de expansión térmica, abrazaderas de baja resistencia se utilizan para las conexiones eléctricas y se utilizan fuentes de alimentación de control proporcional para garantizar la estabilidad. La operación debe pasar rápidamente por el rango de temperatura de "plaga" para evitar la formación de

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

óxidos no protectores, y los recubrimientos de superficie (como SiC o Al₂O₃) mejoran la resistencia al choque térmico y la vida útil.

8.3.1 Proceso de alta temperatura para la fabricación de obleas de silicio

de MoSi₂ se utilizan en el proceso de alta temperatura de fabricación de obleas de silicio para la extracción de silicio monocristalino, la fundición de lingotes de silicio policristalino y el recocido de obleas. Estos procesos requieren un entorno de alta temperatura para fundir las materias primas de silicio, controlar el crecimiento cristalino o eliminar defectos. La resistividad con coeficiente de temperatura positivo de los elementos de MoSi₂ proporciona capacidades de calentamiento estables. Los elementos de MoSi₂ de varilla recta y tipo W son adecuados para hornos grandes de monocristal y de lingotes, cubriendo una amplia área de calentamiento para garantizar la uniformidad del campo térmico. Los elementos tipo U son adecuados para hornos de recocido pequeños para cumplir con los requisitos locales de alta temperatura. La película protectora de SiO₂ permanece estable en una atmósfera oxidante, y el recubrimiento superficial mejora la resistencia al choque térmico y a la corrosión, lo cual es adecuado para el entorno limpio de fabricación de obleas de silicio. Durante la instalación, el elemento se fija mediante un soporte de alúmina de alta pureza, y la conexión eléctrica garantiza un contacto de baja resistencia. Su funcionamiento requiere el control de la atmósfera y de las velocidades de calentamiento y enfriamiento para evitar daños por oxidación. El mantenimiento incluye la inspección periódica de la superficie del elemento y la limpieza del horno. Los elementos MoSi₂ mejoran la calidad del cristal y la eficiencia de producción en la fabricación de obleas de silicio y se utilizan ampliamente en las etapas iniciales de la cadena de suministro de la industria fotovoltaica.

8.3.2 Equipos de producción de células solares

de MoSi₂ se utilizan en hornos de difusión, sinterización y recocido en equipos de producción de células solares para la fabricación de silicio cristalino y células solares de película delgada. El proceso de difusión requiere altas temperaturas para dopar fósforo o boro y formar una unión PN; el proceso de sinterización combina electrodos metálicos con obleas de silicio; y el recocido optimiza el rendimiento de la célula. Los elementos de MoSi₂ proporcionan un control preciso de la temperatura y campos térmicos uniformes para cumplir con los requisitos de estos procesos. Los elementos de MoSi₂ en forma de U y espiral son adecuados para hornos de difusión y recocido pequeños, mientras que los elementos en forma de W son adecuados para hornos de sinterización grandes, garantizando la estabilidad del calentamiento de áreas extensas. La película protectora de SiO₂ y el revestimiento superficial facilitan el funcionamiento a largo plazo del elemento en atmósferas oxidantes, y su resistencia al choque térmico se adapta a ciclos térmicos frecuentes. La instalación utiliza un soporte de alúmina de alta pureza y la conexión eléctrica utiliza una fuente de alimentación de control proporcional para lograr un control preciso de la temperatura. La operación requiere superar rápidamente el rango de temperatura límite, y el mantenimiento incluye la revisión de la película de SiO₂ y la limpieza del horno para evitar la contaminación. Los elementos de MoSi₂ mejoran la eficiencia y el rendimiento de las células solares, y se utilizan ampliamente en la generación de energía fotovoltaica.

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

8.4 Aplicación de elementos calefactores MoSi₂ en la industria de semiconductores

de disiliciuro de molibdeno (MoSi₂) se utilizan ampliamente en procesos de alta temperatura, como el recocido de obleas, los procesos de difusión y el crecimiento epitaxial en la industria de semiconductores, gracias a su rendimiento a alta temperatura, resistencia a la oxidación y estabilidad electrotérmica. Los elementos MoSi₂ proporcionan un control preciso de la temperatura y un campo térmico uniforme, satisfaciendo así las necesidades de la fabricación de semiconductores de un entorno limpio y un control de temperatura de alta precisión. Presentan una excelente resistencia a la oxidación gracias a la película protectora de SiO₂ que se forma en la superficie en atmósfera oxidante, lo que los hace ideales para un funcionamiento a largo plazo. Los elementos MoSi₂ en forma de U, en forma de W y en espiral se personalizan según el tipo de horno. Los tipos en forma de U y en espiral son adecuados para hornos pequeños de alta precisión, mientras que los de forma de W son adecuados para equipos continuos de gran tamaño. Se utilizan soportes de alúmina de alta pureza para su instalación, adaptándose a las características de expansión térmica del MoSi₂ y reduciendo la tensión mecánica. Se utilizan abrazaderas de baja resistencia para las conexiones eléctricas y fuentes de alimentación de control proporcional para garantizar la estabilidad. El funcionamiento debe superar rápidamente el rango de temperatura límite para evitar la formación de óxidos no protectores, y los recubrimientos superficiales (como SiC o Al₂O₃) mejoran aún más la resistencia al choque térmico y la vida útil. Revise periódicamente la integridad de la película de SiO₂ y el estado de la conexión del extremo frío, limpie el horno para evitar la contaminación por impurezas y garantizar la fiabilidad y la eficiencia de los componentes en la industria de semiconductores.

8.4.1 Proceso de recocido y difusión de obleas

de MoSi₂ se utilizan en hornos de recocido térmico rápido (RTA), hornos de difusión y hornos de oxidación en procesos de recocido y difusión de obleas para procesar obleas de silicio y otros materiales semiconductores. El recocido de obleas requiere altas temperaturas para reparar defectos de red, activar dopantes o mejorar las propiedades del material. El proceso de difusión forma una unión PN mediante dopaje a alta temperatura (como fósforo y boro). La resistividad con coeficiente de temperatura positivo de los elementos de MoSi₂ proporciona capacidades de calentamiento estables y garantiza un control preciso de la temperatura. Los elementos de MoSi₂ en forma de U y espiral son adecuados para hornos de recocido y difusión pequeños, adecuados para la producción de lotes pequeños de alta precisión, y los elementos en forma de W son adecuados para hornos de difusión grandes para proporcionar un campo térmico uniforme que permita procesar múltiples obleas. La película protectora de SiO₂ permanece estable en una atmósfera oxidante, y el recubrimiento superficial mejora la resistencia al choque térmico y a la corrosión, lo cual es adecuado para un entorno de proceso de semiconductores limpio. Durante la instalación, el elemento se fija mediante un soporte de alúmina de alta pureza, y la conexión eléctrica garantiza un contacto de baja resistencia. El funcionamiento requiere atmósfera controlada y velocidades de calentamiento y enfriamiento controladas para evitar daños por oxidación. El mantenimiento incluye la inspección regular de la superficie del elemento y la limpieza del horno para evitar que impurezas (como iones metálicos) contaminen la oblea. Los componentes de MoSi₂ mejoran la eficiencia y la

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

calidad de los procesos de recocido y difusión de obleas y se utilizan ampliamente en la fabricación de circuitos integrados y dispositivos de potencia.

8.4.2 Crecimiento epitaxial de semiconductores

de MoSi_2 se utilizan en hornos de deposición química en fase de vapor (CVD) y equipos de epitaxia de haz molecular (MBE) en el crecimiento epitaxial de semiconductores para el crecimiento de películas monocristalinas de alta calidad, como silicio, germanio y semiconductores compuestos (como GaAs, SiC). El crecimiento epitaxial requiere un control preciso del campo térmico a altas temperaturas para garantizar la calidad del cristal y la uniformidad de la película. La alta densidad de potencia y la capacidad de control estable de la temperatura de los elementos MoSi_2 cumplen estos requisitos. Los elementos espirales de MoSi_2 son adecuados para hornos pequeños de CVD, ya que proporcionan un calentamiento centralizado para favorecer un crecimiento de alta precisión. Los elementos de tipo W y de varilla recta son adecuados para hornos epitaxiales grandes para garantizar la uniformidad del campo térmico en obleas de gran superficie. La película protectora de SiO_2 y el revestimiento superficial soportan elementos para un funcionamiento a largo plazo en atmósferas oxidantes o entornos con trazas de oxígeno, y su resistencia al choque térmico se adapta a ciclos térmicos frecuentes. Se utilizan soportes de alúmina de alta pureza para la instalación, y fuentes de alimentación de control proporcional para las conexiones eléctricas, lo que permite un control preciso de la temperatura. El funcionamiento requiere un paso rápido por el rango de temperatura límite, y el mantenimiento incluye la revisión de la película de SiO_2 y la limpieza del horno para evitar la contaminación. Los componentes de MoSi_2 mejoran la calidad y la eficiencia de producción de películas de crecimiento epitaxial y se utilizan ampliamente en la fabricación de dispositivos semiconductores.

8.4.3 Equipo de grabado a alta temperatura

de MoSi_2 se utilizan en hornos de grabado por plasma y hornos de grabado térmico en equipos de grabado de alta temperatura para el modelado de obleas semiconductoras. Los procesos de grabado a alta temperatura requieren un control preciso de la temperatura para optimizar la velocidad y la selectividad del grabado, y garantizar la precisión de las estructuras a escala micrométrica. La resistividad con coeficiente de temperatura positivo y el campo térmico uniforme de los elementos de MoSi_2 cumplen estos requisitos. Los elementos de MoSi_2 en forma de U y espiral son adecuados para hornos de grabado pequeños, ya que proporcionan un calentamiento centralizado para procesos de alta precisión, mientras que los elementos en forma de W son adecuados para equipos de gran tamaño, ya que garantizan la consistencia de la temperatura en múltiples obleas. Las películas protectoras de SiO_2 se mantienen estables en atmósferas oxidantes, y los recubrimientos superficiales (como SiC o Al_2O_3) mejoran la resistencia al choque térmico y a la corrosión para adaptarse a los gases corrosivos (como el cloro o el fluoruro) que pueden estar presentes durante el grabado. Durante la instalación, los elementos se fijan mediante soportes de alúmina de alta pureza y se utilizan abrazaderas de baja resistencia para las conexiones eléctricas, garantizando así su estabilidad. Su funcionamiento requiere el control de la atmósfera y de las velocidades de calentamiento y enfriamiento para evitar daños por oxidación. El mantenimiento incluye la inspección periódica de la superficie de los elementos y la limpieza del horno

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

para evitar que las impurezas contaminen las obleas. Los componentes de MoSi_2 mejoran la precisión y la eficiencia del procesamiento de los equipos de grabado a alta temperatura y se utilizan ampliamente en el procesamiento de microestructuras en la fabricación de semiconductores.

8.4.4 Equipos de recubrimiento al vacío

de MoSi_2 se utilizan en equipos de recubrimiento al vacío en sistemas de deposición física de vapor (PVD) y deposición química de vapor (CVD) para depositar películas de metal, óxido o nitruro, como TiN y Al_2O_3 , para electrodos o capas aislantes de dispositivos semiconductores. El recubrimiento al vacío requiere altas temperaturas para evaporar o descomponer los materiales precursores.

La alta densidad de potencia y la precisa capacidad de control de temperatura de los elementos de MoSi_2 garantizan la uniformidad y calidad de la película. Los elementos de MoSi_2 en forma de U y espiral son adecuados para hornos pequeños de recubrimiento al vacío, ya que proporcionan altas temperaturas locales para una deposición de alta precisión. Los elementos en forma de W y de varilla recta son adecuados para equipos de gran tamaño, garantizando la uniformidad del campo térmico en sustratos de gran superficie. En atmósferas oxidantes o con trazas de oxígeno, la película protectora de SiO_2 y el recubrimiento superficial favorecen el funcionamiento a largo plazo del elemento, y su resistencia al choque térmico se adapta a las rápidas subidas y bajadas de temperatura.

La instalación utiliza un soporte de alúmina de alta pureza, y la conexión eléctrica utiliza una fuente de alimentación de control proporcional para lograr un control de temperatura estable. La operación debe superar rápidamente el rango de temperatura límite para evitar daños por oxidación. El mantenimiento incluye la revisión de la película de SiO_2 y la limpieza del horno para prevenir la contaminación. Los componentes de MoSi_2 mejoran la calidad de la película y la eficiencia de producción de los equipos de recubrimiento al vacío y se utilizan ampliamente en la preparación de películas de dispositivos semiconductores.

8.5 Aplicación de elementos calefactores MoSi_2 en la industria de fabricación de vidrio

de disiliciuro de molibdeno (MoSi_2) se utilizan ampliamente en la fundición y el procesamiento de vidrio en la industria vidriera gracias a su excelente rendimiento a altas temperaturas, resistencia a la oxidación y estabilidad electrotérmica. Los elementos MoSi_2 proporcionan un control preciso de la temperatura y un campo térmico uniforme, cumpliendo así con los requisitos de la industria vidriera en cuanto a alta temperatura, funcionamiento a largo plazo y un entorno limpio. Su excelente resistencia a la oxidación se consigue gracias a la película protectora de SiO_2 que se forma en la superficie en atmósfera oxidante, lo que la hace adecuada para las duras condiciones de trabajo de los hornos de vidrio. Los elementos MoSi_2 de tipo W, tipo U y de varilla recta se personalizan según el tipo de horno. El tipo W es adecuado para hornos de fusión grandes, ya que proporciona un calentamiento uniforme, mientras que los de tipo U y de varilla recta son adecuados para hornos de procesamiento pequeños y medianos. Se utilizan soportes de alúmina de alta pureza para su instalación, adaptándose a las características de expansión térmica del MoSi_2 y reduciendo la tensión mecánica. Se utilizan abrazaderas de baja

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

resistencia para las conexiones eléctricas y fuentes de alimentación de control proporcional para garantizar la estabilidad. La operación debe superar rápidamente el rango de temperatura límite para evitar la formación de óxidos no protectores. Los recubrimientos superficiales (como SiC o Al₂O₃) mejoran aún más la resistencia al choque térmico y la vida útil. Revise periódicamente la integridad de la película de SiO₂ y el estado de la conexión del extremo frío, limpie el horno para evitar la contaminación por impurezas y garantice la fiabilidad y la eficiencia de los componentes en la fabricación de vidrio.

8.5.1 Fusión de vidrio

de MoSi₂ se utilizan en hornos de fusión grandes y pequeños hornos experimentales durante el proceso de fusión de vidrio para la producción de vidrio plano, vidrio óptico y vidrio especial. La fusión de vidrio requiere altas temperaturas para fundir materias primas (como arena de sílice y carbonato sódico) y obtener un vidrio líquido uniforme. La resistividad con coeficiente de temperatura positivo de los elementos de MoSi₂ proporciona un entorno estable a alta temperatura para garantizar la calidad y consistencia de la fusión.

MoSi₂ de tipo W son adecuados para grandes hornos de fusión continua, ya que cubren una amplia área de calentamiento y proporcionan un campo térmico uniforme para reducir la formación de burbujas y vetas en el vidrio. Los elementos de tipo U son adecuados para hornos de fusión pequeños y para la producción de lotes pequeños de vidrio especial. La película protectora de SiO₂ permanece estable en atmósfera oxidante, y el recubrimiento superficial mejora la resistencia al choque térmico y a la corrosión para adaptarse a los componentes volátiles (como los boratos) que puedan estar presentes en el vidrio fundido. Durante la instalación, el elemento se fija mediante un soporte de alúmina de alta pureza, y la conexión eléctrica garantiza un contacto de baja resistencia. El funcionamiento requiere atmósfera controlada y velocidades de calentamiento y enfriamiento controladas para evitar daños por oxidación.

El mantenimiento incluye la inspección regular de la superficie del elemento y la limpieza del horno para evitar que impurezas (como óxidos de metales alcalinos) contaminen el vidrio fundido. Los componentes de MoSi₂ mejoran la eficiencia de la fusión del vidrio y la calidad del producto, y se utilizan ampliamente en la fabricación de vidrio arquitectónico, automotriz y óptico.

8.5.2 Procesamiento del vidrio

de MoSi₂ se utilizan en hornos de recocido, de conformación y de doblado en caliente en la tecnología de procesamiento de vidrio para el conformado, recocido y tratamiento superficial de productos de vidrio. El procesamiento del vidrio requiere un control preciso de la temperatura para eliminar tensiones internas, deformar o mejorar su rendimiento. La alta densidad de potencia y la capacidad de control estable de la temperatura de los elementos de MoSi₂ cumplen estos requisitos. Los elementos de MoSi₂ en forma de U y de varilla recta son adecuados para hornos de recocido y doblado en caliente pequeños y medianos, proporcionando un calentamiento centralizado para facilitar el procesamiento de vidrio de formas

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

complejas. Los elementos en forma de W son adecuados para hornos de conformación de gran tamaño para garantizar la uniformidad de la temperatura en placas de vidrio de gran superficie.

de SiO₂ y el recubrimiento superficial favorecen el funcionamiento a largo plazo de los elementos en atmósfera oxidante, y su resistencia al choque térmico se adapta a ciclos térmicos frecuentes. Para la instalación, se utilizan soportes de alúmina de alta pureza y las conexiones eléctricas se controlan proporcionalmente para lograr un control preciso de la temperatura. El funcionamiento debe superar rápidamente el rango de temperaturas límite, y el mantenimiento incluye la revisión de la película de SiO₂ y la limpieza del horno para evitar la contaminación. Los elementos de MoSi₂ mejoran la precisión y la eficiencia del procesamiento del vidrio y se utilizan ampliamente en la producción de envases de vidrio, vidrio para vitrinas y vidrio arquitectónico.

8.6 Aplicación de elementos calefactores de MoSi₂ en la preparación de nuevos materiales energéticos

de disiliciuro de molibdeno (MoSi₂) desempeñan un papel importante en la preparación de nuevos materiales energéticos debido a su excelente rendimiento a altas temperaturas, resistencia a la oxidación y estabilidad electrotérmica. Se utilizan ampliamente en escenarios de alta demanda, como la sinterización de materiales para baterías de litio, la energía del hidrógeno y los procesos relacionados con las pilas de combustible. Los elementos MoSi₂ pueden lograr una excelente resistencia a la oxidación gracias a la película protectora de SiO₂ que se forma en la superficie en una atmósfera oxidante, lo que los hace adecuados para un funcionamiento a alta temperatura a largo plazo. Al mismo tiempo, sus características de resistividad con coeficiente de temperatura positivo garantizan un control preciso de la temperatura y una distribución uniforme del campo térmico. Estas características les permiten cumplir con los requisitos de un entorno limpio, un control de temperatura de alta precisión y resistencia al ciclo térmico en la preparación de nuevos materiales energéticos. Los elementos MoSi₂ tienen diversas estructuras, como tipo U, tipo W, tipo espiral y tipo varilla recta, que pueden personalizarse según los diferentes requisitos del equipo. Los tipos U y espiral son adecuados para hornos pequeños de sinterización de alta precisión, mientras que los tipos W y de varilla recta son adecuados para equipos de producción continua de gran tamaño. Durante la instalación, se utilizan soportes de alúmina de alta pureza para adaptarse a las características de expansión térmica del MoSi₂ y reducir la tensión mecánica y la concentración de tensión térmica. Se utilizan abrazaderas de baja resistencia para las conexiones eléctricas, y se logra un funcionamiento estable mediante una fuente de alimentación de control proporcional. Durante el funcionamiento, es necesario superar rápidamente el rango de temperatura de "enfermedad" para evitar la formación de óxidos no protectores. Los recubrimientos superficiales (como SiC o Al₂O₃) mejoran aún más la resistencia al choque térmico y a la corrosión, y prolongan la vida útil de los componentes. El mantenimiento regular incluye la comprobación de la integridad de la película de SiO₂, el estado de la conexión del extremo frío y la limpieza del horno para garantizar la ausencia de impurezas y cumplir con los estrictos requisitos para la preparación de nuevos materiales energéticos. Los elementos MoSi₂ proporcionan un soporte fiable para la mejora del rendimiento y la eficiencia de la producción de nuevos materiales energéticos al optimizar el diseño del campo térmico y los parámetros operativos.

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

8.6.1 Sinterización de materiales de baterías de litio

de MoSi_2 se utilizan ampliamente en la preparación de electrodos positivos y negativos, así como de materiales electrolíticos sólidos en el proceso de sinterización de baterías de litio. Se emplean para producir materiales clave como óxido de litio y cobalto, materiales ternarios de níquel-cobalto y manganeso, fosfato de litio y hierro, electrodo negativo de grafito y electrolito de óxido sólido. La sinterización de baterías de litio requiere altas temperaturas para promover el crecimiento cristalino, mejorar la densidad del material y las propiedades electroquímicas. La alta densidad de potencia y la precisa capacidad de control de temperatura de los elementos MoSi_2 cumplen con estos exigentes requisitos. Los elementos MoSi_2 en forma de U y espiral son adecuados para pequeños hornos de sinterización de laboratorio, para el desarrollo de nuevos materiales de baterías o para la producción de lotes pequeños, ya que proporcionan un calentamiento centralizado que garantiza una alta precisión del proceso. Los elementos en forma de W y de varilla recta son adecuados para grandes hornos de sinterización industriales, que pueden cubrir una amplia área de calentamiento y proporcionar un campo térmico uniforme para la producción a gran escala. La película protectora de SiO_2 permanece estable en atmósferas oxidantes, lo que garantiza la resistencia a la oxidación de los componentes durante el proceso de sinterización. El recubrimiento superficial (como SiC o Al_2O_3) mejora la resistencia al choque térmico y a la corrosión, y se adapta a los gases volátiles o a las atmósferas corrosivas traza (como compuestos volátiles que contienen litio) que puedan existir durante el proceso de sinterización. Durante la instalación, los componentes se fijan mediante soportes de alúmina de alta pureza, suspendidos verticalmente u horizontalmente para reducir la tensión mecánica. La conexión eléctrica utiliza una abrazadera de baja resistencia y una fuente de alimentación de control proporcional para lograr un control preciso de la temperatura. La operación requiere un control estricto de la atmósfera en el horno para evitar la rotura de la película de SiO_2 debido a un entorno reductor o de alta humedad, y una rápida transición a la temperatura límite para prevenir la formación de óxidos no protectores. El mantenimiento incluye la inspección regular del estado de la superficie de los componentes, las conexiones del extremo frío y la limpieza del horno, así como la eliminación de impurezas que puedan afectar la pureza de los materiales (como los óxidos de metales alcalinos). Los componentes MoSi_2 optimizan el diseño del campo térmico y los parámetros operativos para garantizar que los materiales de las baterías de litio obtengan una excelente estructura cristalina y propiedades electroquímicas durante el proceso de sinterización, lo que mejora significativamente la capacidad, la vida útil y la seguridad de la batería. Se utilizan ampliamente en vehículos eléctricos, sistemas de almacenamiento de energía y electrónica de consumo.

8.6.2 Energía del hidrógeno y pilas de combustible

de MoSi_2 se utilizan principalmente en la sinterización de materiales de celdas de combustible de óxido sólido (SOFC), el proceso de preparación de reactores de producción de hidrógeno y componentes de alta temperatura de electrolizadores, y se utilizan para producir electrolitos, ánodos, materiales catódicos y portadores de catalizadores de alta temperatura. La preparación de materiales para celdas de combustible y energía de hidrógeno requiere sinterización o tratamiento térmico a altas temperaturas para optimizar la microestructura y el rendimiento de los materiales. El rendimiento estable a alta temperatura y la distribución uniforme del campo térmico de los elementos MoSi_2 pueden cumplir con estos requisitos

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

del proceso. Los elementos MoSi_2 en espiral y en forma de U son adecuados para hornos experimentales pequeños, adecuados para el desarrollo de nuevos materiales de celdas de combustible o catalizadores, y proporcionan altas temperaturas locales para respaldar los procesos de sinterización o tratamiento térmico de alta precisión. Los elementos de varilla recta y de tipo W son adecuados para grandes hornos industriales para la producción a gran escala de componentes de SOFC o componentes de equipos de producción de hidrógeno para garantizar la uniformidad del campo térmico y reducir los defectos del material.

La película protectora de SiO_2 proporciona una protección antioxidante fiable en atmósferas oxidantes. El recubrimiento superficial (como Al_2O_3 o SiC) mejora la resistencia al choque térmico y a la corrosión, adaptándose a las atmósferas complejas (como vapor de agua o gases reductores traza) que pueden estar involucradas en la sinterización de los materiales de las pilas de combustible. En la preparación de reactores de producción de hidrógeno o componentes de electrolizadores, los elementos de MoSi_2 facilitan la sinterización o el tratamiento térmico de los portadores de catalizador de alta temperatura para garantizar una alta actividad y estabilidad del catalizador. Durante la instalación, los elementos se fijan mediante soportes de alúmina de alta pureza y se utilizan abrazaderas de baja resistencia para las conexiones eléctricas. La fuente de alimentación de control proporcional permite un control preciso de la temperatura, cumpliendo con los requisitos de las SOFC para curvas de temperatura estrictas. La operación requiere el control de la atmósfera del horno para evitar que el entorno altamente reductor dañe la membrana de SiO_2 y superar rápidamente el rango de temperatura límite para prevenir daños por oxidación. El mantenimiento incluye la inspección regular de la membrana de SiO_2 , la conexión del extremo frío y la limpieza del horno para garantizar que no haya impurezas que afecten el rendimiento del material. Los componentes de MoSi_2 mejoran el rendimiento electroquímico de los materiales de las pilas de combustible y la eficiencia de los equipos de producción de hidrógeno al optimizar los campos térmicos y los parámetros del proceso. Se utilizan ampliamente en la generación de energía limpia, la producción industrial de hidrógeno y la conversión energética, lo que supone un importante apoyo para el desarrollo comercial de la tecnología energética del hidrógeno.

8.7 Aplicación de elementos calefactores de MoSi_2 en la protección ambiental y la catálisis

de disiliciuro de molibdeno (MoSi_2) se utilizan ampliamente en el tratamiento de gases residuales, la regeneración de catalizadores y la recuperación de residuos sólidos en el ámbito de la protección ambiental y la catálisis, gracias a su excelente rendimiento a altas temperaturas, resistencia a la oxidación y estabilidad electrotérmica. Los elementos MoSi_2 alcanzan una excelente resistencia a la oxidación gracias a la película protectora de SiO_2 que se forma en su superficie en atmósfera oxidante, siendo adecuados para operaciones a alta temperatura a largo plazo. Sus características de resistividad con coeficiente de temperatura positivo garantizan un control preciso de la temperatura y una distribución uniforme del campo térmico, cumpliendo así con los requisitos de los procesos catalíticos y de protección ambiental en cuanto a alta temperatura, ambiente limpio y resistencia a la corrosión. Los elementos MoSi_2 en forma de U, en forma de W, en espiral y de varilla recta se personalizan según los requisitos del equipo. Los tipos en forma de U y en espiral son adecuados para pequeños reactores de alta precisión, mientras que los tipos en forma de W y de varilla recta son adecuados para grandes equipos de

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

procesamiento continuo. Se utilizan soportes de alúmina de alta pureza para su instalación, adaptándose a las características de expansión térmica del MoSi_2 y reduciendo las tensiones mecánicas y térmicas. Se utilizan abrazaderas de baja resistencia para las conexiones eléctricas, y se logra un funcionamiento estable con fuentes de alimentación de control proporcional.

El funcionamiento debe superar rápidamente el rango de temperatura de "enfermedad" para evitar la formación de óxidos no protectores. El recubrimiento superficial (como SiC o Al_2O_3) mejora aún más la resistencia al choque térmico y a la corrosión, y prolonga la vida útil de los componentes. El mantenimiento regular incluye la comprobación de la integridad de la película de SiO_2 , el estado de la conexión del extremo frío y la limpieza del horno para garantizar la ausencia de impurezas y cumplir con los altos estándares de protección ambiental y catálisis. Los elementos MoSi_2 contribuyen de forma clave a la eficiencia y fiabilidad del tratamiento de gases de escape, la regeneración del catalizador y el aprovechamiento de residuos sólidos, optimizando el diseño del campo térmico y los parámetros operativos.

8.7.1 Tratamiento de gases residuales

de MoSi_2 se utilizan en incineradores de alta temperatura, hornos de oxidación catalítica y hornos de pirólisis en el proceso de tratamiento de gases residuales para tratar gases residuales industriales, compuestos orgánicos volátiles (COV) y gases nocivos (como NO_x , SO_x). El tratamiento de gases residuales requiere altas temperaturas para descomponer los componentes nocivos o promover reacciones catalíticas. La alta densidad de potencia y la precisa capacidad de control de temperatura de los elementos de MoSi_2 garantizan que el reactor alcance la temperatura requerida y mantenga un campo térmico uniforme, promoviendo la descomposición y conversión eficientes de los gases residuales. Los elementos de MoSi_2 de tipo W y de varilla recta son adecuados para hornos de tratamiento de gases residuales de gran tamaño, cubriendo una amplia área de calentamiento y permitiendo el tratamiento continuo de gases residuales.

Los elementos de tipo U y en espiral son adecuados para hornos pequeños o de laboratorio, adecuados para experimentos de alta precisión o tratamiento a pequeña escala. La película protectora de SiO_2 permanece estable en atmósferas oxidantes, y el recubrimiento superficial mejora la resistencia al choque térmico y a la corrosión, adaptándose a los gases corrosivos (como cloruros o sulfuros) presentes en los gases residuales. Durante la instalación, el elemento se fija mediante un soporte de alúmina de alta pureza, y la conexión eléctrica utiliza una abrazadera de baja resistencia, acoplada a una fuente de alimentación de control proporcional para lograr un control preciso de la temperatura. La operación requiere controlar la atmósfera del horno para evitar que el entorno altamente reductor dañe la película de SiO_2 y superar rápidamente el rango de temperatura de "enfermedad" para prevenir daños por oxidación. El mantenimiento incluye la inspección regular del estado de la superficie de los componentes y la limpieza del horno, así como la eliminación de impurezas que puedan afectar el efecto del tratamiento. Los componentes de MoSi_2 mejoran la eficiencia de descomposición y el índice de cumplimiento de emisiones del tratamiento de gases residuales, y se utilizan ampliamente en las industrias química, energética y de protección ambiental.

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

8.7.2 Regeneración del catalizador

MoSi₂ se utilizan en hornos de regeneración de alta temperatura y hornos de tratamiento térmico en el proceso de regeneración del catalizador para restaurar la actividad de los catalizadores, como los catalizadores de craqueo catalítico en petroquímicos, los catalizadores de reducción catalítica selectiva (SCR) en el campo de la protección ambiental y los catalizadores industriales (como los catalizadores de metales preciosos). Tras un uso prolongado, el catalizador se desactiva debido a la deposición de materiales carbonosos, sulfuros u otras sustancias tóxicas en su superficie. El proceso de regeneración requiere quemar estos depósitos a altas temperaturas, protegiendo al mismo tiempo la microestructura y los sitios activos del catalizador para restaurar su rendimiento catalítico. La alta densidad de potencia y la precisa capacidad de control de temperatura de los elementos MoSi₂ proporcionan un entorno estable a alta temperatura para garantizar la eficiencia del proceso de regeneración y la recuperación del rendimiento del catalizador.

MoSi₂ en forma de U y espiral son adecuados para hornos de regeneración pequeños, ya sea en laboratorios o en procesos de regeneración a pequeña escala. Proporcionan calefacción centralizada para un control de temperatura de alta precisión y satisfacen las necesidades de catalizadores específicos para curvas de temperatura estrictas. Los elementos MoSi₂ en forma de W y de varilla recta son adecuados para hornos de regeneración industriales de gran tamaño, ya que pueden cubrir una amplia área de calentamiento, proporcionar un campo térmico uniforme para el procesamiento de catalizadores por lotes y garantizar la consistencia de los efectos de regeneración. La película protectora de SiO₂ permanece estable en una atmósfera oxidante, y el recubrimiento superficial (como SiC o Al₂O₃) mejora la resistencia al choque térmico y a la corrosión, y se adapta a gases corrosivos (como atmósferas con azufre o cloro) o a los frecuentes ciclos térmicos que puedan existir durante el proceso de regeneración.

Durante la instalación, el elemento se fija mediante un soporte de alúmina de alta pureza, suspendido verticalmente o con soporte horizontal para reducir la tensión mecánica. La conexión eléctrica utiliza una abrazadera de baja resistencia y una fuente de alimentación de control proporcional para lograr un control preciso de la temperatura. El funcionamiento requiere un control estricto de la atmósfera del horno para evitar que el entorno de alta reducción destruya la película de SiO₂ y superar rápidamente el rango de temperatura límite para prevenir la formación de óxidos no protectores. El mantenimiento incluye la inspección regular del estado de la superficie del elemento, la conexión del extremo frío y la limpieza del horno, así como la eliminación de impurezas (como óxidos metálicos) que puedan afectar la pureza del catalizador. Los elementos de MoSi₂ optimizan el campo térmico y los parámetros del proceso para garantizar una alta eficiencia y un efecto de recuperación de la actividad en la regeneración del catalizador, prolongando así su vida útil. Se utilizan ampliamente en los sectores de la petroquímica, la protección ambiental y la catálisis industrial.

8.7.3 Aprovechamiento de recursos de residuos sólidos

de MoSi₂ se utilizan en hornos de pirólisis de alta temperatura, incineradores y hornos de sinterización en procesos de reciclaje de residuos sólidos para tratar residuos sólidos industriales, basura urbana,

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

residuos peligrosos y recuperar materiales valiosos (como metales, cerámica o vidrio). El reciclaje de residuos sólidos requiere altas temperaturas para descomponer la materia orgánica, volatilizar sustancias nocivas o sinterizar componentes de residuos sólidos para formar materiales reutilizables. El rendimiento estable a alta temperatura y la distribución uniforme del campo térmico de los elementos de MoSi₂ cumplen con estos requisitos del proceso. Los elementos de MoSi₂ de tipo W y de varilla recta son adecuados para hornos de pirólisis o incineración de gran tamaño, ya que cubren una amplia área de calentamiento, facilitan el tratamiento continuo de residuos sólidos y garantizan la eficiencia y la consistencia del proceso de pirólisis o sinterización. Los elementos de MoSi₂ de tipo U y de espiral son adecuados para pequeños hornos experimentales o para el tratamiento de recursos de residuos sólidos específicos, para procesos de alta precisión o fines de I+D, y proporcionan calefacción centralizada para optimizar las condiciones de reacción. La película protectora de SiO₂ proporciona una protección antioxidante fiable en atmósferas oxidantes. El recubrimiento superficial mejora la resistencia al choque térmico y a la corrosión, adaptándose a las complejas atmósferas presentes en el tratamiento de residuos sólidos (como cloro, azufre o metales pesados volátiles).

Durante la instalación, los componentes se fijan mediante soportes de alúmina de alta pureza y las conexiones eléctricas se realizan mediante abrazaderas de baja resistencia. La fuente de alimentación de control proporcional permite un control preciso de la temperatura, cumpliendo así con los requisitos de control de la utilización de residuos sólidos para curvas de temperatura específicas. La operación requiere el control de la atmósfera del horno para evitar que el entorno altamente reductor dañe la película de SiO₂ y superar rápidamente el rango de temperatura límite para prevenir daños por oxidación. El mantenimiento incluye la inspección regular de la película de SiO₂, la conexión del extremo frío y la limpieza del horno, así como la eliminación de impurezas que puedan afectar la calidad de los productos derivados de recursos. Los componentes MoSi₂ favorecen la descomposición eficiente, la recuperación de materiales y la utilización de recursos de residuos sólidos al proporcionar un entorno confiable de alta temperatura, y se utilizan ampliamente en las industrias de protección ambiental, economía circular y reciclaje de recursos.

8.8 Aplicación de elementos calefactores de MoSi₂ en otros campos

de disiliciuro de molibdeno (MoSi₂) han demostrado un valor de aplicación único en campos de alta tecnología como la industria aeroespacial y nuclear debido a su excelente rendimiento a alta temperatura, resistencia a la oxidación y estabilidad electrotérmica. Los elementos MoSi₂ pueden lograr una excelente resistencia a la oxidación a través de la película protectora de SiO₂ formada en la superficie en una atmósfera oxidante, que es adecuada para el funcionamiento a alta temperatura a largo plazo.

Sus características de resistividad de coeficiente de temperatura positivo garantizan un control preciso de la temperatura y una distribución uniforme del campo térmico, cumpliendo con los requisitos de condiciones de trabajo complejas para alta temperatura, entorno limpio y resistencia al ciclo térmico . Los elementos MoSi₂ en forma de U, en forma de W, espiral y de varilla recta se personalizan según los requisitos del equipo. Los tipos en forma de U y espiral son adecuados para hornos pequeños de alta

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

precisión, y los tipos en forma de W y de varilla recta son adecuados para pruebas grandes o equipos auxiliares.

Se utilizan soportes de alúmina de alta pureza para la instalación, adaptándose a las características de expansión térmica del MoSi_2 y reduciendo la tensión mecánica y térmica. Las conexiones eléctricas se realizan con abrazaderas de baja resistencia, y se logra un funcionamiento estable mediante una fuente de alimentación de control proporcional. El funcionamiento debe superar rápidamente el rango de temperatura de "enfermedad" para evitar la formación de óxidos no protectores. El recubrimiento superficial (como SiC o Al_2O_3) mejora aún más la resistencia al choque térmico y a la corrosión, prolongando así la vida útil del componente. El mantenimiento regular incluye la comprobación de la integridad de la película de SiO_2 , el estado de la conexión del extremo frío y la limpieza del horno para garantizar la ausencia de impurezas y cumplir con los estrictos requisitos de las industrias aeroespacial y nuclear. Los elementos MoSi_2 proporcionan un soporte fiable para las pruebas de materiales y el funcionamiento de equipos en el campo de la alta tecnología, optimizando el diseño del campo térmico y los parámetros operativos.

8.8.1 Pruebas de materiales aeroespaciales

de MoSi_2 se utilizan en hornos de prueba de alta temperatura, hornos de prueba de ciclo térmico y equipos de simulación ambiental en pruebas de materiales aeroespaciales para evaluar el rendimiento de materiales aeroespaciales clave, como aleaciones de alta temperatura, compuestos de matriz cerámica y compuestos de fibra de carbono. Los materiales aeroespaciales deben someterse a pruebas de rendimiento mecánico, térmico y químico en condiciones de temperatura extremadamente alta para verificar su fiabilidad en motores, álabes de turbinas o sistemas de protección térmica de naves espaciales.

La alta densidad de potencia y la precisa capacidad de control de temperatura de los elementos de MoSi_2 permiten simular estos entornos hostiles. Los elementos de MoSi_2 en forma de U y espiral son adecuados para hornos de prueba pequeños, ya que proporcionan un calentamiento centralizado para facilitar pruebas de alta precisión, ideales para la exposición térmica o experimentos de ciclo térmico con muestras pequeñas. Los elementos de varilla recta y en forma de W son adecuados para hornos de prueba grandes, ya que pueden cubrir una amplia área de calentamiento y proporcionar un campo térmico uniforme para probar piezas estructurales de gran tamaño. La película protectora de SiO_2 permanece estable en atmósferas oxidantes, y el recubrimiento superficial mejora la resistencia al choque térmico y a la corrosión, adaptándose a atmósferas oxidantes o con trazas de corrosión que puedan estar presentes en la prueba.

Durante la instalación, el elemento se fija mediante un soporte de alúmina de alta pureza, y la conexión eléctrica utiliza una abrazadera de baja resistencia, acoplada a una fuente de alimentación de control proporcional para lograr un control preciso de la curva de temperatura. El funcionamiento requiere un control estricto de la atmósfera del horno para evitar que el entorno de reducción dañe la película de SiO_2 y superar rápidamente el rango de temperatura de "enfermedad" para prevenir daños por oxidación. El mantenimiento incluye la inspección regular del estado de la superficie del componente, la conexión del

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

extremo frío y la limpieza del horno para garantizar que ninguna impureza afecte los resultados de las pruebas. Los componentes de MoSi₂ facilitan las pruebas de alta precisión de materiales aeroespaciales al proporcionar un entorno estable a alta temperatura y un rendimiento fiable del ciclo térmico, lo que proporciona datos clave para el desarrollo y la certificación de materiales.

8.8.2 Equipos auxiliares de la industria nuclear

de MoSi₂ se utilizan en hornos de sinterización de alta temperatura, hornos de tratamiento térmico y reactores experimentales, como parte de los equipos auxiliares de la industria nuclear, para la preparación de elementos combustibles nucleares, materiales de reactores y el ensayo y procesamiento de cerámicas o aleaciones de alta temperatura relacionadas. La industria nuclear exige un control de temperatura, limpieza y estabilidad a largo plazo de los equipos extremadamente exigentes. El rendimiento estable a alta temperatura y la distribución uniforme del campo térmico de los elementos de MoSi₂ cumplen con estos requisitos. Los elementos de MoSi₂ en forma de U y espiral son adecuados para hornos experimentales pequeños, para la sinterización y el tratamiento térmico de partículas de combustible nuclear o materiales de reactores pequeños, y proporcionan un control de temperatura de alta precisión para garantizar el rendimiento del material. Los elementos de varilla recta y en forma de W son adecuados para equipos auxiliares de gran tamaño, como hornos de sinterización de barras de combustible nuclear o hornos de tratamiento térmico de componentes de reactores, proporcionando un calentamiento uniforme de gran superficie para facilitar la producción en masa.

La película protectora de SiO₂ y el recubrimiento superficial garantizan el funcionamiento prolongado de los componentes en atmósferas oxidantes o ligeramente corrosivas, y su resistencia al choque térmico se adapta a ciclos térmicos frecuentes. Para la instalación, se utilizan soportes de alúmina de alta pureza y las conexiones eléctricas se utilizan con potencia de control proporcional para lograr un control preciso de la temperatura y cumplir con los estrictos requisitos de la industria nuclear en cuanto a parámetros de proceso. La operación requiere el control de la atmósfera del horno para evitar que el entorno altamente reductor dañe la película de SiO₂ y superar rápidamente el rango de temperatura límite para prevenir daños por oxidación. El mantenimiento incluye inspecciones periódicas de la película de SiO₂, las conexiones del extremo frío y la limpieza del horno para garantizar que no haya impurezas que afecten la calidad de los materiales nucleares. Los elementos de MoSi₂ facilitan la preparación y la verificación del rendimiento de materiales clave en la industria nuclear, proporcionando un entorno fiable a alta temperatura, lo que garantiza la seguridad y la eficiencia de la tecnología de energía nuclear.

8.8.3 Química sintética de alta temperatura

de MoSi₂ se utilizan en reactores y hornos experimentales en química sintética de alta temperatura para la síntesis de cerámicas de alta temperatura, compuestos intermetálicos, materiales funcionales y productos químicos de alto rendimiento. La química sintética de alta temperatura requiere que las reacciones se lleven a cabo en condiciones de temperatura estrictamente controladas para garantizar la pureza, la estructura cristalina y las propiedades químicas de los productos. La alta densidad de potencia y la precisa capacidad de control de temperatura de los elementos MoSi₂ pueden proporcionar un entorno

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

de reacción estable. Los elementos MoSi₂ en forma de U y espiral son adecuados para hornos experimentales pequeños, adecuados para la síntesis química a escala de laboratorio o la investigación y el desarrollo de nuevos materiales, proporcionando calefacción centralizada para un control de temperatura de alta precisión. Los elementos en forma de W y de varilla recta son adecuados para reactores grandes, lo que facilita la producción de productos químicos o materiales a escala industrial, asegurando la uniformidad del campo térmico para reducir las reacciones desiguales.

La película protectora de SiO₂ permanece estable en una atmósfera oxidante, y el recubrimiento superficial (como SiC o Al₂O₃) mejora la resistencia al choque térmico y a la corrosión, adaptándose a los gases corrosivos o productos volátiles que puedan estar presentes durante el proceso de síntesis. Durante la instalación, los componentes se fijan mediante soportes de alúmina de alta pureza, y se utilizan abrazaderas de baja resistencia para las conexiones eléctricas. Además, se utiliza una fuente de alimentación de control proporcional para lograr un control preciso de la curva de temperatura. La operación requiere controlar la atmósfera del horno para evitar que el entorno altamente reductor destruya la película de SiO₂, y pasar rápidamente al rango de temperatura límite para prevenir daños por oxidación. El mantenimiento incluye la inspección regular del estado de la superficie del componente, la conexión del extremo frío y la limpieza del horno para garantizar que no haya impurezas que afecten la calidad del producto sintetizado. Los componentes de MoSi₂ contribuyen a la eficiencia de las reacciones y a la calidad del producto en la química sintética de alta temperatura, proporcionando un entorno fiable a alta temperatura, y se utilizan ampliamente en las industrias química y de materiales avanzados.

8.8.4 Transformador de varillas de MoSi₂

de MoSi₂ se utilizan como fuentes de calor de alta temperatura en aplicaciones relacionadas con transformadores para pruebas de materiales, tratamiento térmico de materiales aislantes y procesos de alta temperatura durante la fabricación. La fabricación de transformadores implica el tratamiento a alta temperatura de láminas de acero al silicio, cerámicas aislantes u otros materiales resistentes a altas temperaturas. El rendimiento estable a altas temperaturas y la distribución uniforme del campo térmico de los elementos de MoSi₂ permiten cumplir con estos requisitos. Los elementos de MoSi₂ en forma de U y espiral son adecuados para hornos pequeños de tratamiento térmico, para el calentamiento local de componentes de transformadores o para pruebas de laboratorio, y proporcionan un control de temperatura de alta precisión para optimizar las propiedades del material. Los elementos de varilla recta y en forma de W son adecuados para grandes hornos industriales para el recocido de láminas de acero al silicio o la sinterización de materiales aislantes, lo que facilita la producción en masa y garantiza la uniformidad del campo térmico. La película protectora de SiO₂ proporciona una protección antioxidante fiable en atmósferas oxidantes, y el recubrimiento superficial mejora la resistencia al choque térmico y a la corrosión, adaptándose a la atmósfera corrosiva presente en la fabricación de transformadores. La instalación utiliza un soporte de alúmina de alta pureza, y la conexión eléctrica utiliza una fuente de alimentación de control proporcional para lograr un control preciso de la temperatura y garantizar la estabilidad de los parámetros del proceso. La operación debe superar rápidamente el rango de temperatura de "enfermedad" para evitar daños por oxidación. El mantenimiento incluye la inspección regular de la película de SiO₂, la conexión del extremo frío y la limpieza del horno para garantizar que

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

ninguna impureza afecte la calidad del material. Los componentes de MoSi_2 proporcionan un entorno confiable a alta temperatura, facilitan el tratamiento térmico y la optimización del rendimiento de materiales clave en la fabricación de transformadores, mejoran la eficiencia y la fiabilidad de los transformadores y son ampliamente utilizados en la fabricación de equipos de potencia.



CTIA GROUP LTD Varilla de silicato de molibdeno

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

Capítulo 9 Comparación de elementos calefactores de MoSi₂ con otros materiales calefactores

de disiliciuro de molibdeno (MoSi₂) se utilizan ampliamente en el calentamiento a alta temperatura debido a su excelente rendimiento a alta temperatura, resistencia a la oxidación y estabilidad electrotérmica. En comparación con otros materiales calefactores comunes, como el tungsteno y el carburo de silicio (SiC), los elementos MoSi₂ tienen ventajas únicas en cuanto a resistencia a la oxidación, rango de temperatura de operación y adaptabilidad al proceso, pero también tienen ciertas limitaciones. Este capítulo compara el rendimiento de MoSi₂ con elementos calefactores de tungsteno y elementos de carburo de silicio, analiza sus diferencias en cuanto a coste, eficiencia y adaptabilidad de la aplicación, y proporciona orientación para seleccionar materiales calefactores adecuados en diferentes condiciones de trabajo. Los elementos MoSi₂ deben instalarse con soportes de alúmina de alta pureza para que coincidan con las características de expansión térmica, y deben utilizarse abrazaderas de baja resistencia para las conexiones eléctricas, con una fuente de alimentación de control proporcional para garantizar la estabilidad. El funcionamiento debe superar rápidamente el rango de temperatura límite para evitar la formación de óxidos no protectores. Los recubrimientos superficiales (como SiC o Al₂O₃) pueden mejorar la resistencia al choque térmico y a la corrosión. El mantenimiento regular incluye la comprobación de la integridad de la película de SiO₂ y del estado de la conexión del extremo frío para garantizar la ausencia de impurezas.

9.1 Comparación con elementos calefactores de tungsteno

Los elementos calefactores de MoSi₂ y de tungsteno presentan ventajas específicas en aplicaciones de alta temperatura, pero presentan diferencias significativas en sus aplicaciones y características de rendimiento. Los elementos de MoSi₂ logran una excelente resistencia a la oxidación gracias a la película protectora de SiO₂ que se forma en su superficie en atmósfera oxidante, lo que los hace ideales para un funcionamiento a largo plazo. Su temperatura máxima de funcionamiento puede alcanzar los 1850 °C y se utiliza ampliamente en procesos en entornos oxidantes como la sinterización de cerámica, la fusión de vidrio y la fabricación de semiconductores. Las características de resistividad con coeficiente de temperatura positivo del MoSi₂ le permiten ajustar la potencia de forma adaptativa y proporcionar un control de temperatura estable, ideal para aplicaciones que requieren un control de temperatura de alta precisión. Presenta un coeficiente de expansión térmica moderado, buena resistencia al choque térmico, soporta ciclos térmicos frecuentes y es adecuado para diseños estructurales en forma de U, W o espiral. El proceso de fabricación de los elementos de MoSi₂ (como la pulvimetalurgia y el prensado isostático) permite una personalización flexible de las formas para satisfacer los requisitos complejos de los hornos. Sin embargo, MoSi₂ es propenso a generar óxidos no protectores en el rango de temperatura de "plaga" de 400-700 °C, y se requieren aumentos y caídas rápidas de temperatura para evitar la degradación del material, y la temperatura de operación debe reducirse en un entorno reductor o de vacío para proteger la película de SiO₂.

Por el contrario, los elementos calefactores de tungsteno son conocidos por su punto de fusión extremadamente alto y su excelente resistencia mecánica, lo que los hace adecuados para aplicaciones de temperatura ultraalta (como el tratamiento térmico de metales al vacío o en atmósfera inerte). Los

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

elementos de tungsteno son muy susceptibles a la oxidación en atmósferas oxidantes y requieren protección al vacío o con gas inerte, lo que limita su uso en entornos oxidantes. El tungsteno tiene baja resistividad y varía menos con la temperatura, lo que lo hace adecuado para escenarios que requieren alta potencia de salida. Sin embargo, su precisión en el control de temperatura es menor que la del MoSi₂, lo que requiere un sistema de control de potencia más complejo. Los elementos de tungsteno tienen un bajo coeficiente de expansión térmica y poca resistencia al choque térmico. Los ciclos térmicos frecuentes pueden provocar fractura frágil, lo que limita su aplicación bajo cargas térmicas dinámicas. Los elementos de tungsteno tienen altos costos de fabricación y procesamiento, y son difíciles de personalizar. Suelen ser estructuras de alambre o varilla, lo que limita la flexibilidad de diseño de hornos complejos. Además, el tungsteno tiene una alta densidad, lo que resulta en un elemento más pesado y un diseño más complejo de la instalación y la estructura de soporte.

La comparación entre el MoSi₂ y el tungsteno muestra que el MoSi₂ presenta mayor resistencia a la oxidación y precisión en el control de temperatura en atmósferas oxidantes, siendo adecuado para industrias como la cerámica, el vidrio y los semiconductores. Por otro lado, el tungsteno es más adecuado para aplicaciones de ultraalta temperatura (como la fusión de aleaciones a alta temperatura) en vacío o atmósfera inerte. La selección debe basarse en el entorno del proceso, los requisitos de temperatura y la frecuencia del ciclo térmico. La estabilidad y flexibilidad a largo plazo del MoSi₂ en entornos oxidantes lo hacen más ventajoso en la mayoría de los hornos de alta temperatura.

9.2 Comparación con componentes de carburo de silicio

de MoSi₂ y de carburo de silicio (SiC) son opciones comunes en el campo del calentamiento a alta temperatura, pero existen diferencias obvias en su rendimiento y escenarios de aplicación. Los elementos de MoSi₂ muestran una excelente resistencia a la oxidación en atmósferas oxidantes gracias a la película protectora superficial de SiO₂, y su temperatura máxima de funcionamiento puede alcanzar los 1850 °C, lo que resulta adecuado para procesos de alta precisión y alta temperatura, como la sinterización de cerámica, la fusión de vidrio y el crecimiento epitaxial de semiconductores. Sus características de resistividad con coeficiente de temperatura positivo permiten una regulación de potencia adaptativa, proporcionan un control preciso de la temperatura y son adecuados para aplicaciones que requieren un campo térmico estable. El MoSi₂ presenta un coeficiente de expansión térmica moderado, buena resistencia al choque térmico y puede soportar ciclos térmicos frecuentes. Las estructuras en forma de U, W y espiral son adecuadas para diversos diseños de hornos. El proceso de fabricación de los elementos de MoSi₂ es flexible y se pueden producir formas complejas mediante pulvimetalurgia y prensado isostático para satisfacer necesidades personalizadas. Sin embargo, el MoSi₂ es propenso a una oxidación no protectora en el rango de temperatura de "plaga", lo que requiere un rápido aumento y caída de la temperatura, y la temperatura de operación debe reducirse en un entorno reductor o de vacío para proteger la película de SiO₂.

de SiC son conocidos por su alta dureza, resistencia al desgaste y estabilidad química, y se usan ampliamente en hornos industriales y procesos de temperatura media y alta. Los elementos de SiC también pueden formar una película protectora de SiO₂ en una atmósfera oxidante y tienen buena

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

resistencia a la oxidación, pero su temperatura máxima de operación suele ser inferior a la del MoSi_2 y son adecuados para procesos de 1300-1600 °C. La resistividad del SiC varía de forma más compleja con la temperatura, mostrando una característica de coeficiente de temperatura negativo (la resistencia disminuye a altas temperaturas), lo que puede provocar una salida de potencia inestable, y se requiere un sistema de control preciso para mantener la uniformidad de la temperatura. Los elementos de SiC tienen un coeficiente de expansión térmica menor y son ligeramente menos resistentes al choque térmico que el MoSi_2 . Los ciclos térmicos frecuentes pueden causar microfisuras, especialmente en elementos grandes. El proceso de fabricación de elementos de SiC (como la sinterización reactiva o la recristalización) limita la complejidad de la forma, que suele ser de varilla o tubular, y la flexibilidad de personalización es menor que la del MoSi_2 . Además, los elementos de SiC pueden sufrir corrosión local en atmósferas corrosivas que contienen azufre o halógenos, lo que requiere medidas adicionales de protección superficial.

comparación entre MoSi_2 y SiC muestra que el MoSi_2 ofrece ventajas en rangos de temperatura más altos y escenarios de control preciso de temperatura, y es adecuado para industrias de alta tecnología como la fabricación de semiconductores y cerámicas especiales, mientras que el SiC es más adecuado para aplicaciones industriales de temperatura media y alta, sensibles a los costos, como el tratamiento térmico de metales y la sinterización de cerámica convencional. Al seleccionar un material, se deben considerar la temperatura del proceso, las condiciones atmosféricas y los requisitos del ciclo térmico.

9.3 Análisis del coste, la eficiencia y la idoneidad de la aplicación de los elementos calefactores

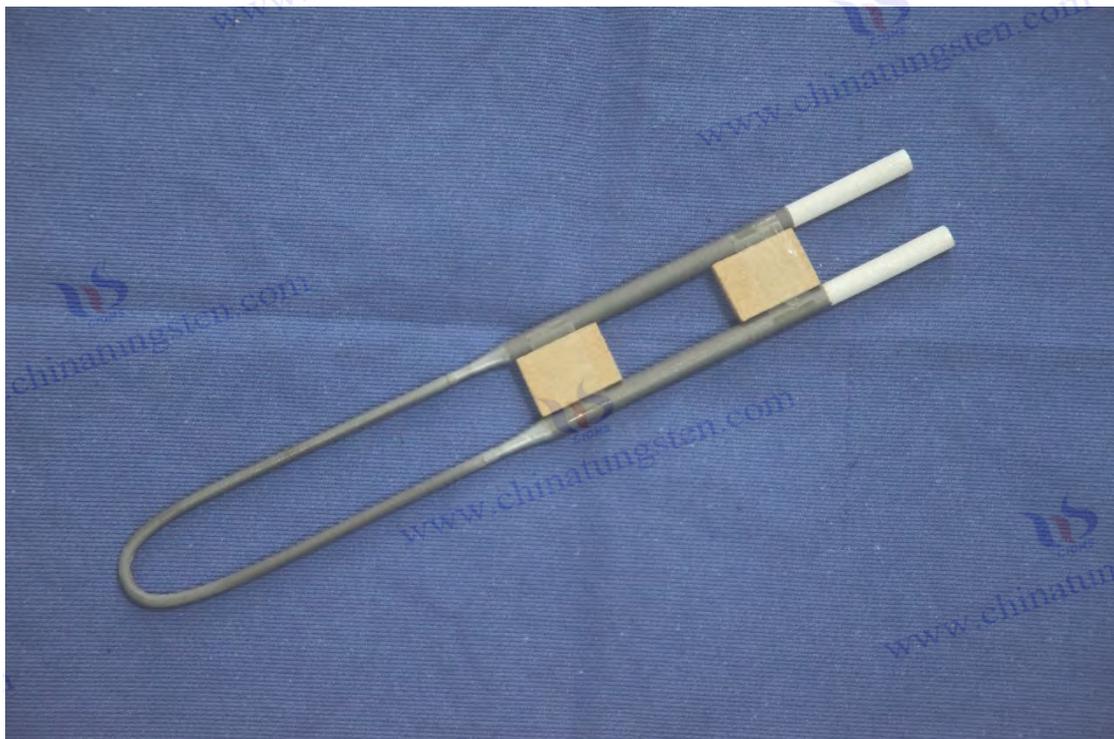
Las diferencias en costo, eficiencia e idoneidad de los elementos calefactores de MoSi_2 , tungsteno y SiC influyen directamente en su selección en diferentes industrias. El costo de fabricación de los elementos de MoSi_2 es moderado, y los procesos de pulvimetalurgia y prensado isostático son avanzados, lo que permite la producción de formas complejas (como en U, W y espiral) para satisfacer las necesidades de diversos tipos de hornos. El MoSi_2 presenta una alta eficiencia operativa, y sus características de resistividad con coeficiente de temperatura positivo facilitan la regulación adaptativa de la potencia, reducen el desperdicio de energía y son adecuados para escenarios que requieren un control preciso de la temperatura y un funcionamiento a largo plazo, como la sinterización de cerámica, el procesamiento de vidrio y la fabricación de semiconductores. El MoSi_2 presenta una excelente resistencia a la oxidación en atmósferas oxidantes y bajos costos de mantenimiento, pero requiere una rápida transición a temperaturas extremas para evitar daños por oxidación, y los recubrimientos superficiales pueden prolongar aún más su vida útil. Los elementos MoSi_2 tienen una amplia gama de adaptabilidad de aplicaciones y son adecuados para procesos de alta temperatura en una atmósfera oxidante, pero la temperatura debe reducirse en un entorno reductor o de vacío, lo que limita su uso en algunos tratamientos de metales de temperatura ultra alta.

El costo de fabricación de los elementos calefactores de tungsteno es relativamente alto debido a la dificultad de procesamiento debido a su alto punto de fusión. La mayoría de ellos se presentan en forma de alambres o varillas, lo que resulta costoso para personalizar formas complejas. El tungsteno presenta una mayor eficiencia operativa en vacío o atmósfera inerte, lo que lo hace adecuado para aplicaciones de

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

temperatura ultraalta (como la fusión de aleaciones a alta temperatura). Sin embargo, se oxida con mucha facilidad en una atmósfera oxidante, lo que requiere un sistema de control de atmósfera adicional, lo que incrementa los costos de operación y mantenimiento. Los elementos de tungsteno tienen baja resistencia al choque térmico y los ciclos térmicos frecuentes pueden causar fracturas. El costo de mantenimiento es elevado. Es adecuado para escenarios con requisitos extremadamente altos de alta temperatura y entornos de vacío, como las pruebas de materiales aeroespaciales, pero su rango de aplicación es limitado debido a las restricciones atmosféricas.

de SiC tienen costos de fabricación relativamente bajos y un proceso de sinterización por reacción relativamente sencillo, lo que los hace adecuados para la producción a gran escala de elementos tubulares o de varilla. La eficiencia operativa del SiC es alta en el rango de temperatura media y alta, pero sus características de resistividad con coeficiente de temperatura negativo pueden provocar inestabilidad de potencia, lo que requiere un sistema de control complejo para mantener la uniformidad de la temperatura, lo que incrementa los costos operativos. Los elementos de SiC tienen buena resistencia a la oxidación en atmósferas oxidantes, pero pueden experimentar degradación local en atmósferas corrosivas y tienen costos de mantenimiento moderados.



CTIA GROUP LTD Varilla de molibdeno de silicio

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

Capítulo 10 Normas y especificaciones relevantes para elementos calefactores de MoSi₂

de disiliciuro de molibdeno (MoSi₂) deben cumplir con estrictas normas y especificaciones para garantizar la calidad del producto, la estabilidad del rendimiento y la seguridad del proceso. A nivel mundial, las normas nacionales de China, las normas internacionales y las normas pertinentes de Europa, América, Japón y Corea del Sur proporcionan orientación técnica para la fabricación y el uso de elementos calefactores de MoSi₂ . Estas normas abarcan la composición química, las propiedades físicas, el proceso de fabricación, los métodos de prueba y las especificaciones de aplicación del material. Este capítulo presenta en detalle las normas nacionales chinas, las normas internacionales y las normas pertinentes de Europa, América, Japón y Corea del Sur para elementos calefactores de MoSi₂ , con el objetivo de proporcionar una referencia para fabricantes, ingenieros y usuarios. La estandarización de los elementos de MoSi₂ ayuda a unificar la calidad del producto, mejorar la intercambiabilidad y promover el comercio global y la cooperación técnica.

10.1 Norma nacional china para elementos calefactores de MoSi₂

La norma nacional china (GB/T) ha formulado diversas especificaciones para la producción, las pruebas de rendimiento y la aplicación de elementos calefactores de MoSi₂ , gestionadas principalmente por el Comité Técnico Nacional de Normalización de Metales No Ferrosos (TC243) y otras instituciones. Estas normas garantizan la estabilidad y seguridad del rendimiento de los elementos de MoSi₂ en entornos oxidantes de alta temperatura y son adecuadas para industrias como la sinterización de cerámica, la fundición de vidrio y la fabricación de semiconductores. Las normas pertinentes incluyen el análisis químico de materiales, las pruebas de propiedades físicas y los requisitos técnicos para equipos de calefacción eléctrica industrial. Por ejemplo, la norma de composición química de los elementos de MoSi₂ especifica los requisitos de contenido y el control de impurezas de elementos principales como el molibdeno y el silicio para garantizar la resistencia a la oxidación y la estabilidad electrotérmica. Las normas de rendimiento físico incluyen métodos de prueba de resistividad, coeficiente de expansión térmica, resistencia al choque térmico y resistencia mecánica para garantizar la fiabilidad de los elementos a altas temperaturas y ciclos térmicos frecuentes. Además, las normas para equipos de calentamiento eléctrico industrial establecen requisitos para la instalación, operación y mantenimiento de elementos de MoSi₂ , como el uso de soportes de alúmina de alta pureza para cumplir con las características de expansión térmica, la rápida transición a temperaturas límite para evitar la formación de óxidos no protectores y la comprobación periódica de la integridad de la película protectora de SiO₂ . Estas normas son emitidas por la Administración Estatal de Regulación del Mercado y la Administración Nacional de Normalización. Algunas de ellas hacen referencia o adoptan normas internacionales no equivalentes (como las especificaciones ISO) para adaptarse a las necesidades industriales de China y mantenerse al día con las normas internacionales.

10.2 Normas internacionales para elementos calefactores de MoSi₂

La Organización Internacional de Normalización (ISO) y la Comisión Electrotécnica Internacional (IEC) han desarrollado normas internacionales relacionadas con los elementos calefactores de MoSi₂,

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

centrándose principalmente en materiales de alta temperatura, equipos industriales de calentamiento eléctrico y métodos de prueba de rendimiento. Estas normas proporcionan un marco técnico unificado para la producción y aplicación global de elementos de MoSi_2 , que abarca las propiedades de los materiales, los procesos de fabricación y las especificaciones de prueba. Por ejemplo, las normas ISO pueden incluir métodos de prueba de rendimiento para cerámicas de alta temperatura o compuestos intermetálicos, incluyendo pruebas de resistencia a la oxidación, conductividad térmica y resistividad, para garantizar la estabilidad a largo plazo de los elementos de MoSi_2 en atmósferas oxidantes. Las normas IEC se centran en los requisitos técnicos de los equipos industriales de calentamiento eléctrico, especificando la conexión eléctrica, la precisión del control de temperatura y los requisitos de seguridad de los elementos de MoSi_2 , como el uso de abrazaderas de baja resistencia y la configuración de fuentes de alimentación de control proporcional. Las normas internacionales también incluyen métodos de ensayo para la resistencia al choque térmico y la resistencia a la corrosión de componentes en entornos de alta temperatura, lo que orienta a los fabricantes a optimizar los recubrimientos superficiales (como SiC o Al_2O_3) para prolongar su vida útil. Además, las normas ISO e IEC enfatizan las especificaciones de funcionamiento de los componentes en atmósferas específicas (como entornos oxidantes o con trazas de oxígeno), que requieren una transición rápida a bajas temperaturas para evitar la oxidación por plagas. Estas normas promueven la intercambiabilidad y la cooperación técnica de los componentes de MoSi_2 en el mercado global y se utilizan ampliamente en los campos de la cerámica, los semiconductores y la preparación de materiales para nuevas energías.

10.3 Estándares de elementos calefactores MoSi_2 en Europa, América, Japón, Corea y otros países

de MoSi_2 en Europa, América, Japón, Corea del Sur y otros países son formuladas por las agencias de normalización de cada país, combinando las necesidades industriales locales con las normas internacionales y abarcando las propiedades de los materiales, los procesos de fabricación y las especificaciones de aplicación. En Europa, el Comité Europeo de Normalización (CEN) y otras instituciones (como el Instituto Alemán de Normalización DIN y el Instituto Británico de Normalización BSI) han formulado normas relacionadas con los elementos calefactores eléctricos de alta temperatura, que abarcan la composición química, la resistividad, el coeficiente de expansión térmica y los métodos de ensayo de resistencia a la oxidación de los elementos de MoSi_2 .

Estas normas enfatizan la estabilidad a largo plazo de los componentes en una atmósfera oxidante, especifican las condiciones de formación y los requisitos de resistencia a la corrosión de la película protectora superficial de SiO_2 , y son aplicables a industrias como la sinterización de cerámica y el procesamiento de vidrio. La norma DIN puede refinar aún más las especificaciones de instalación de elementos MoSi_2 , como el uso de soportes de alúmina de alta pureza y el diseño de baja resistencia de las conexiones eléctricas. Las normas formuladas por el Instituto Nacional Americano de Estándares (ANSI) se centran en el rendimiento y la seguridad de los equipos de calentamiento eléctrico industrial, lo que implica la precisión del control de temperatura y las pruebas de rendimiento del ciclo térmico de los elementos MoSi_2 para garantizar su confiabilidad en las pruebas de materiales semiconductores y aeroespaciales. Japón y Corea del Sur han desarrollado especificaciones relevantes para componentes de MoSi_2 a través de las Normas Industriales Japonesas (JIS) y la Agencia Coreana de Tecnología y Normas

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

(KATS). Estas especificaciones se centran en aplicaciones en la fabricación de semiconductores y cerámicas de alta temperatura, y especifican las condiciones de funcionamiento de los componentes en atmósferas oxidantes y ligeramente corrosivas, como el rápido aumento y descenso de la temperatura para evitar la oxidación por plagas. Estas normas suelen referirse a los marcos ISO e IEC, pero se adaptan a las características industriales locales (como las necesidades de fabricación de precisión de Japón), haciendo hincapié en el control de temperatura de alta precisión y el diseño de componentes de larga duración. Las normas europeas, estadounidenses, japonesas y coreanas promueven la aplicación y el comercio de componentes de MoSi_2 en el mercado global mediante métodos de prueba y requisitos de calidad unificados .



CTIA GROUP LTD Varilla de molibdeno de silicio

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

Apéndice: Glosario de términos para elementos calefactores de MoSi₂

Términos profesionales comunes y sus definiciones en el campo de los elementos calefactores de disiliciuro de molibdeno (MoSi₂), que ofrecen referencias técnicas claras para fabricantes, ingenieros y usuarios. Estos términos abarcan aspectos como las propiedades de los materiales, los procesos de fabricación, las pruebas de rendimiento y los escenarios de aplicación, lo que ayuda a comprender las características y especificaciones de uso de los elementos calefactores de MoSi₂ .

el término	definición
Disiliciuro de molibdeno (MoSi₂)	Un compuesto intermetálico formado por molibdeno y silicio que tiene un alto punto de fusión, alta resistencia a la oxidación y excelentes propiedades electrotérmicas y se utiliza a menudo en elementos de calentamiento de alta temperatura.
Película protectora de SiO₂	de MoSi ₂ en una atmósfera oxidante para evitar una mayor oxidación del material y mejorar la estabilidad a altas temperaturas.
Oxidación de la plaga	El MoSi ₂ forma óxidos no protectores (como una mezcla de MoO ₃ y SiO ₂) en el rango de temperatura de 400-700° C, lo que hace que el material se pulverice y se deteriore.
Resistividad de coeficiente de temperatura positivo (PTC)	MoSi ₂ que aumenta con la temperatura admite una regulación de potencia adaptativa y es adecuada para aplicaciones de control de temperatura preciso.
Extremo caliente	El elemento calefactor de MoSi ₂ suele ser más delgado y se encarga de generar el calor principal. Las especificaciones comunes incluyen Φ6 mm o Φ9 mm.
Unión fría	El elemento calefactor MoSi ₂ suele ser más grueso (como Φ12 mm o Φ18 mm) y está dopado con materiales conductores para reducir la resistividad.
Elemento en forma de U	Una estructura de elementos calefactores de MoSi ₂ , en forma de U, adecuada para hornos pequeños o calefacción central, fácil de instalar y reemplazar.
Componentes de tipo W	Elemento calefactor MoSi ₂ , en forma de W, adecuado para hornos grandes, que proporciona un campo de calor uniforme y buena resistencia al choque térmico.
Elemento espiral	El elemento calefactor MoSi ₂ es adecuado para hornos de tubo o calentamiento de alta precisión, con campo de calor concentrado y control de temperatura preciso.
Elemento de varilla recta	de MoSi ₂ son adecuados para el calentamiento uniforme de grandes áreas y se utilizan a menudo en hornos industriales continuos.
Coefficiente de expansión térmica	MoSi ₂ tiene una temperatura de aproximadamente $8,1 \times 10^{-6} K^{-1}$, lo que afecta el diseño correspondiente de los componentes y los soportes.

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

Resistencia al choque térmico	de MoSi ₂ a cambios rápidos de temperatura sin agrietarse está relacionada con su tenacidad a la fractura y sus propiedades de expansión térmica.
Tenacidad a la fractura	MoSi ₂ a la propagación de grietas es generalmente baja, y es necesario optimizar el proceso para reducir el riesgo de microgrietas.
Conductividad térmica	MoSi ₂ para conducir el calor afecta la uniformidad del campo térmico y la eficiencia de calentamiento.
Densidad de potencia	La potencia de calentamiento por unidad de área refleja la capacidad de calentamiento del elemento MoSi ₂ y debe adaptarse según el tipo de horno y el proceso.
Prensado en caliente (HP)	Un proceso de fabricación de componentes MoSi ₂ que utiliza moldeo a alta temperatura y presión para mejorar la densidad y las propiedades mecánicas.
Sinterización sin presión	Un proceso de fabricación de componentes MoSi ₂ de menor costo y con una densidad ligeramente menor, adecuado para aplicaciones menos exigentes.
Síntesis de alta temperatura autopropagante (SHS)	de MoSi ₂ mediante la ignición de polvo mixto Mo-Si para inducir una reacción exotérmica es de bajo costo pero tiene poca uniformidad.
Prensado isostático	de MoSi ₂ que utilizan una presión uniforme son adecuados para producir componentes con formas complejas.
Recubrimiento de superficies	una capa protectora (como SiC , Al ₂ O ₃) aplicada a la superficie de MoSi ₂ para mejorar la resistencia al choque térmico y la resistencia a la corrosión.
Pulverización de plasma	Una técnica para aplicar recubrimientos superficiales mediante pulverización de plasma a alta temperatura para formar un recubrimiento denso adecuado para aplicaciones industriales.
Deposición química de vapor (CVD)	componentes MoSi ₂ de alta precisión .
Prueba de resistividad	Para medir la resistividad de los componentes MoSi ₂ se utiliza generalmente el método de cuatro sondas para evaluar el rendimiento electrotérmico.
Prueba de antioxidantes	Evaluar la estabilidad de los componentes MoSi ₂ en atmósferas oxidantes de alta temperatura, midiendo el espesor de la película de SiO ₂ y la pérdida de masa.
Prueba de rendimiento de choque térmico	El experimento simula un rápido aumento y caída de la temperatura para probar la resistencia a las grietas de los componentes de MoSi ₂ y evalúa los cambios en las microgrietas y la resistencia mecánica.
Prueba de dureza Vickers	de MoSi ₂ mediante un durómetro Vickers refleja la resistencia al desgaste y las propiedades mecánicas.
Atmósfera oxidante	Entorno operativo que contiene oxígeno (presión parcial de oxígeno ≥ 0,2 atm), la principal condición de aplicación de los componentes MoSi ₂ .

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

Atmósfera reductora	En un entorno que contiene gases reductores, como hidrógeno o monóxido de carbono, es necesario reducir la temperatura de funcionamiento de MoSi ₂ para evitar fallas en la película de SiO ₂ .
Fuente de alimentación de control proporcional	Un sistema de suministro de energía que regula con precisión la potencia de los componentes MoSi ₂ , logrando un control de temperatura estable con sus características de coeficiente de temperatura positivo.
Pinza de baja resistencia	para conectar la unión fría de MoSi ₂ a la fuente de alimentación, con baja resistencia de contacto y asegurando la estabilidad eléctrica.
Soporte de alúmina de alta pureza	Se utiliza para soportar componentes MoSi ₂ , adaptando el coeficiente de expansión térmica para reducir la tensión térmica.
Uniformidad del campo térmico	La uniformidad de la distribución de la temperatura en el horno se ve afectada por la disposición y la conductividad térmica de los componentes MoSi ₂ y requiere un diseño optimizado.
Modificación del dopaje	de agregar una pequeña cantidad de elementos (como Y ₂ O ₃ , Al ₂ O ₃) a MoSi ₂ para mejorar la resistencia del límite de grano o la resistencia a la oxidación.
Metalurgia de polvos	de MoSi ₂ obtenidos mediante prensado y sinterización de polvo, adecuados para la producción de formas complejas.
Tasa de pérdida de calidad	MoSi ₂ sometidos a oxidación a alta temperatura reflejan el rendimiento antioxidante.
Tamaño del grano	El tamaño del grano del cristal en la microestructura de MoSi ₂ afecta la resistencia mecánica y la resistencia al choque térmico.

Ilustrar:

Este glosario se basa en las prácticas de fabricación, prueba y aplicación de elementos calefactores de MoSi₂ y se refiere a la literatura y datos técnicos relevantes. Las definiciones de términos son concisas y precisas, y son aplicables a los campos de la cerámica, el vidrio, los semiconductores, las nuevas energías y la protección del medio ambiente. Los usuarios pueden complementar o adaptar la terminología según los requisitos específicos del proceso.

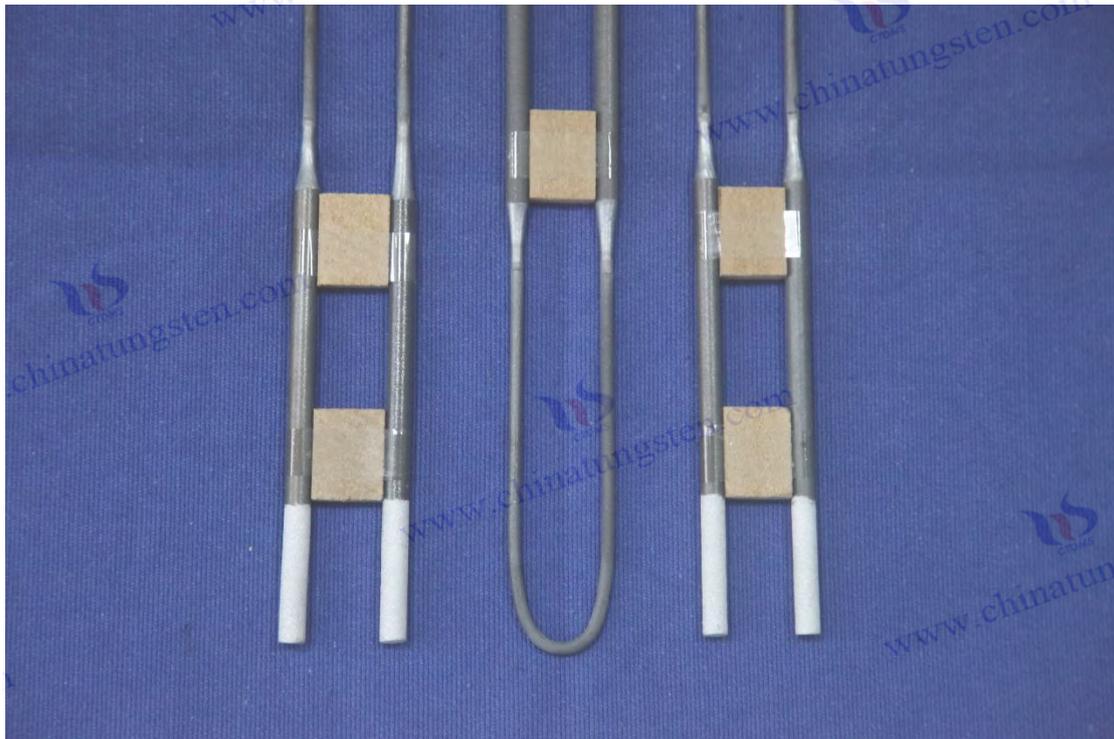


CTIA GROUP LTD Varilla de molibdeno de silicio

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

Literatura inglesa

- [1] Avances en materiales basados en MoSi_2 para aplicaciones de alta temperatura. Ciencia e Ingeniería de Materiales: A, 2010.
- [2] Propiedades eléctricas y térmicas de elementos calefactores de MoSi_2 . Ceramics International, 2005.
- [3] Disiliciuro de molibdeno. American Elements.
- [4] Elementos calefactores de disiliciuro de molibdeno. Stanford Advanced Materials.
- [5] Guía del usuario de elementos calefactores de disiliciuro de molibdeno.
- [6] Materiales basados en MoSi_2 y sus propiedades. Revista de Ciencia de Materiales, 1999.
- [7] Elementos calefactores de MoSi_2 . Kanthal®.
- [8] Comportamiento de oxidación de materiales a base de MoSi_2 . Revista de la Sociedad Americana de Cerámica, 2001.
- [9] Recubrimientos superficiales para elementos calefactores de MoSi_2 . Tecnología de Superficies y Recubrimientos, 2008.
- [10] Choque térmico y comportamiento a la fatiga de elementos calefactores basados en MoSi_2 . Journal of Materials Research, 2003.



CTIA GROUP LTD Varilla de molibdeno de silicio

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT